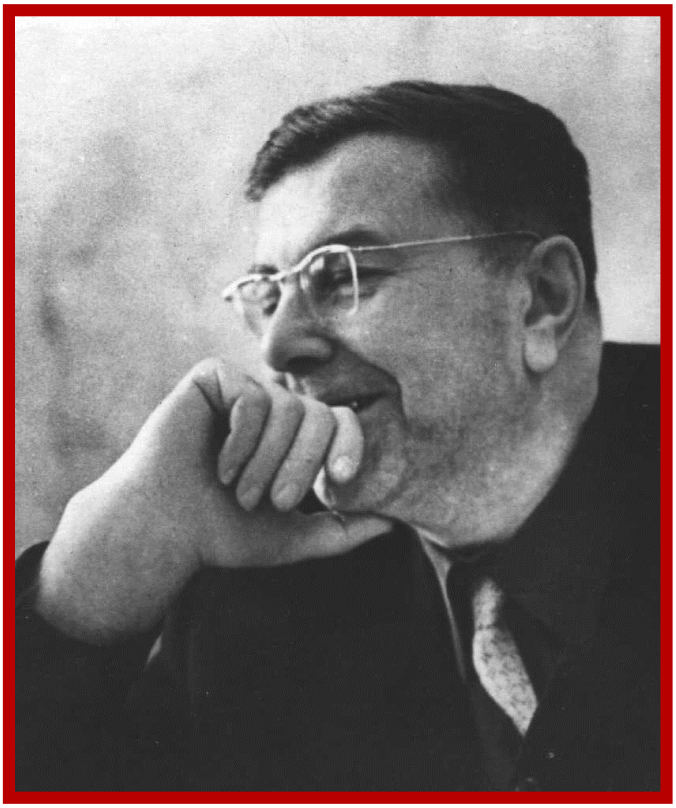
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Уральское Отделение
ИНСТИТУТ ГЕОФИЗИКИ
ИМ. Ю.П. БУЛАШЕВИЧА
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ, ГЕОДИНАМИКА,
ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ,
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

ВОСЬМЫЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ Ю.П. БУЛАШЕВИЧА

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

ЕКАТЕРИНБУРГ
14 – 18
СЕНТЯБРЯ
2015

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Уральское отделение
ИНСТИТУТ ГЕОФИЗИКИ
Российский фонд научных исследований

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ, ГЕОДИНАМИКА, ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ, ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Восьмые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича
4 - 18 сентября 2015 г.

Материалы конференции

Екатеринбург
2015

УДК 550.83

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ, ГЕОДИНАМИКА, ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ, ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ. Восьмые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2015. - 410 с.

Приведены материалы докладов, сделанных на Восьмых научных чтениях памяти первого директора Института геофизики УрО РАН, члена-корреспондента РАН Ю.П. Булашевича, состоявшихся в Екатеринбурге с 14 по 18 сентября 2015 г.

Представленные материалы посвящены рассмотрению исследований, традиционных для творчества Ю.П. Булашевича: геофизические исследования глубинного строения земной коры, геодинамики, теплового поля Земли и интерпретации геофизических полей. Представлены новые научные и практические разработки в области глубинного строения и физики твердой Земли, а также новые методы исследований и гипотезы, основанные на новейших геофизических данных.

Сборник представляет интерес для широкого круга специалистов научных и производственных организаций, занимающихся геофизическими и геологическими исследованиями природных и природно-техногенных объектов.

Редакционная коллегия:
П.С. Мартышко – член-корреспондент РАН – ответственный редактор
Ю.В. Хачай - д.ф.м.н., г.н.с.
А.Л. Рублев – к.ф.м.н., с.н.с.

©ИГф УрО РАН, 2015

ОРГКОМИТЕТ

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:
П.С. Мартышко – член-корреспондент РАН, профессор, д.ф.-м.н.,
Институт геофизики УрО РАН

Члены Оргкомитета:
Глико А.О. – академик, академик-секретарь ОНЗ РАН
Эпов М.И. – академик, директор ИНГГ СО РАН
Бычков С.Г. – д.г.-м.н., зав. лабораторией ГИ РАН, Пермь
Беликов В.Т. – д.ф.-м.н., врио директора ИГф УрО РАН
Астраханцев Ю.Г. – д.т.н., зав. лабораторией скважинной геофизики ИГф УрО РАН
Иголкина Г.В. – д.г.-м.н., зав. лабораторией промысловой геофизики ИГф УрО РАН
Начапкин Н.И. – к.г.-м.н., зав. лабораторией региональной геофизики ИГф УрО РАН
Ратушняк А.Н. – к.т.н., зав. лабораторией электрометрии ИГф УрО РАН
Сенин Л.Н. – д.т.н., зав. лаборатории сейсмометрией ИГф УрО РАН
Шестаков А.Ф. – д.ф.-м.н., зав. лабораторией экологической геофизики ИГф УрО РАН
Юрков А.К. – к.г.-м.н., зав. лабораторией ядерной геофизики ИГф УрО РАН
Кусонский О.А. – к.г.-м.н., зав.обсерваторией “Арти” ИГф УрО РАН
Хачай Ю.В.– д.ф.-м.н.

Ученые секретари конференции:
Рублев А.Л. - к.ф.-м.н., ИГФ УрО РАН, Екатеринбург
Козлова И.А. - к.г.-м.н., ИГФ УрО РАН, Екатеринбург

Адрес Оргкомитета:
Институт геофизики УрО РАН
ул. Амундсена, 100, 620016 Екатеринбург
Телефон: (343) 267 88 89, 267 88 66
Факс: (343) 267 88 72
E-mail: bulashevich_2015@mail.ru

Редакционная коллегия:
П.С. Мартышко – член-корр. РАН – ответственный редактор
Ю.В. Хачай - д.ф.м.н.
А.Л. Рублев – к.ф.м.н.

УДК 550.831.017:004.021:519:612.2:519:64

ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ГРАВИМЕТРИИ О НАХОЖДЕНИИ ПЛОТНОСТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ

***Е.Н. Акимова*[1, 2], *В.Е. Мисилов*[1, 2], *Р.А. Косивец*[2]**

E-mail: aen@yandex.ru, out.mrscreg@gmail.com, ros7363@gmail.com

[1] *Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской Академии наук, г. Екатеринбург, Россия*

[2] *Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

Аннотация. Построен эффективный алгоритм решения обратной задачи гравиметрии о восстановлении переменной плотности в горизонтальном слое по гравитационным данным. После дискретизации и аппроксимации задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Идея алгоритма основана на использовании блочно-тёплицевой структуры матрицы коэффициентов. Использование данного алгоритма значительно снижает расходы памяти и уменьшает время решения задачи. Проведено распараллеливание алгоритма и его реализация на суперкомпьютере «Уран». Решена модельная задача о восстановлении плотности по синтетическим гравитационным данным.

OPTIMIZED ALGORITHM FOR SOLVING A GRAVITY PROBLEM OF FINDING A DENSITY IN A HORIZONTAL LAYER

***E.N. Akimova*[1, 2], *V.E. Misilov*[1, 2], *R.A. Kosivets*[2]**

E-mail: aen@yandex.ru, out.mrscreg@gmail.com, ros7363@gmail.com

[1] Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

[2] Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. An effective algorithm for an inverse gravity problem of finding a variable density in a horizontal layer using gravitational data is constructed. After the discretization and approximation, the problem reduces to solving a system of linear algebraic equations. The idea of this algorithm is based on exploiting block-Toeplitz structure of coefficients matrix. Utilizing of this algorithm drastically reduces memory usage and also reduces computation time. The algorithm was parallelized and implemented using the Uran supercomputer. A model problem with synthetic gravitational data was solved.

1. Постановка обратной задачи и метод решения

Рассматривается задача о нахождении переменной плотности в горизонтальном слое $\Pi = \{(x, y, z) : H_1 \le z \le H_2\}$ по гравитационным данным $\Delta g(x, y)$, измеренным на площади $D = \{(x, y) : a \le x \le b, c \le y \le d\}$ земной поверхности. Используется априорная информация об отсутствии аномалий плотности вне слоя с границами H_1 и H_2. Для этого проводится предварительная обработка данных по методике П. С. Мартышко, И. Л. Пруткина [1]. Предполагается, что распределение плотности $\sigma(x, y)$ внутри слоя не зависит от z.

Тогда в декартовой системе координат (ось z направлена вниз), выражение для гравитационного эффекта слоя имеет вид [2, 3]

$$\mathrm{A}\sigma = f \int_a^b \int_c^d \left\{ \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + H_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + H_2^2}} \right\} \sigma(x', y')\, dx'\, dy' = \Delta g(\quad (1)$$

где f — гравитационная постоянная.

Задача (1) является линейным двумерным интегральным уравнением Фредгольма первого рода и после дискретизации на сетке $n = M \times N$, где задана правая часть $\Delta g(x, y)$, и аппроксимации интегрального оператора A по квадратурным формулам принимает вид

$$f\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left\{\frac{1}{\sqrt{\left(x_v-x_i\right)^2+\left(y_u-y_j\right)^2+H_1^2}}-\frac{1}{\sqrt{\left(x_v-x_i\right)^2+\left(y_u-y_j\right)^2+H_2^2}}\right\}\sigma_{(i-1)M+j}\Delta x\Delta y=b_{(v-} \quad (2)$$

$u=1..M,\ v=1..N.$

Уравнение (2) представляет собой систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с симметричной положительно определенной матрицей размерности $n\times n=MN\times MN$

$$\bar{A}z=b. \quad (3)$$

Для сеток большой размерности хранение матрицы $\bar{A}$ требует значительных объемов оперативной памяти, поэтому имеет смысл исследовать ее структуру с целью оптимизации хранения.

Задача гравиметрии (1) относится к классу некорректно поставленных задач, поэтому СЛАУ (3), возникающая после дискретизации, является плохо обусловленной. После применения регуляризации по схеме Лаврентьева [4], СЛАУ (3) преобразуется к виду:

$$Az=b, \quad (4)$$

где $A=\left(\bar{A}+\alpha E\right)$, α — параметр регуляризации. В данной работе для решения СЛАУ (4) применяется итерационный метод минимальных невязок [5]:

$$z^{k+1}=z^k-\frac{\left\langle A\left(Az^k-b\right),Az^k-b\right\rangle}{A\left(Az^k-b\right)^2}\left(Az^k-b\right), \quad (5)$$

где k — номер итерации.

В качестве начального приближения берется либо априорно известная средняя плотность $z^0=\sigma_0$, либо $z^0=0.$ Итерационный процесс останавливается при выполнении соотношения $\left\|Az^k-b\right\|/\|b\|<\varepsilon$ при достаточно малом ε.

2. Исследование структуры матрицы и построение способа хранения

Рассмотрим матрицу A как блочную и переобозначим индексы элементов:

$$a_{k,i,l,j}=a_{(k-1)M+i,(l-1)M+j}=f\Delta x\Delta y\left(\frac{1}{\sqrt{\left(x_k-x_l\right)^2+\left(y_i-y_j\right)^2+H_1^2}}-\frac{1}{\sqrt{\left(x_k-x_l\right)^2+\left(y_i-y_j\right)^2+H_2^2}}\right),$$

где $k,l=1..M$ — индексы блока, а $i,j=1..N$ — индексы элементов внутри каждого блока. Очевидно, что элементы матрицы зависят только от $(x_k-x_l)^2+(y_i-y_j)^2$. Заметим, что

$$\left(x_k-x_l\right)^2+\left(y_{i+1}-y_{j+1}\right)^2=\left(x_k-x_l\right)^2+\left(y_i+\Delta y-y_j-\Delta y\right)^2=\left(x_k-x_l\right)^2+\left(y_i-y_j\right)^2;$$

$$\left(x_{k+1}-x_{l+1}\right)^2+\left(y_i-y_j\right)^2=\left(x_k+\Delta x-x_l-\Delta x\right)^2+\left(y_i-y_j\right)^2=\left(x_k-x_l\right)^2+\left(y_i-y_j\right)^2.$$

Из первого выражения следует, что $i=j\Rightarrow a_{k,i,l,j}=a_{k,i+1,l,j+1}$, т.е. в каждом блоке на каждой диагонали, параллельной главной, стоят одинаковые элементы. Из второго следует, что $k=l\Rightarrow a_{k,i,l,j}=a_{k+1,i,l+1,j}$, т.е. на уровне блоков на каждой диагонали, параллельной главной, стоят одинаковые блоки. Другими словами, матрица A является симметричной тёплицево-блочно-тёплицевой. Схематично её структура представлена на рисунке 1.

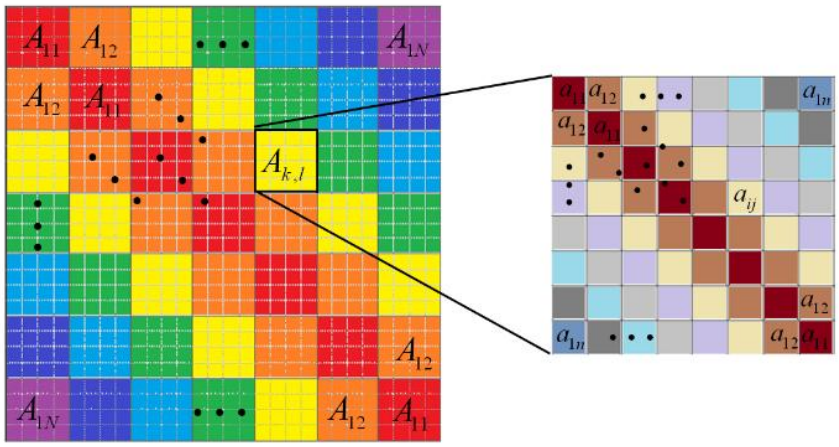


Рис. 1. Структура матрицы

Очевидным способом хранения подобной матрицы является хранение только первой строки. Каждая последующая строка получается проведением следующих операций:

1) внутри каждого блока строка элементов сдвигается вправо на один элемент, при этом дополняется слева элементом, симметричными относительно диагонального;

2) далее для всей строки, разбитой на блоки, блоки сдвигаются вправо на один и дополняются сооответствующим блоком.

Несмотря на то, что этот способ требует всего $O(NM)$ памяти, количество пересчетов индексов при доступе к элементам слишком велико.

Более эффективным способом хранения (далее – оптимизированный способ) оказывается хранение симметрично дополненной первой строки блоков, т.е. строки, для которой $k=1$. Каждая последующая строка блоков получается путем сдвига «окна» ширины M влево на один блок. Схема хранения и доступа изображена на рисунке 2.

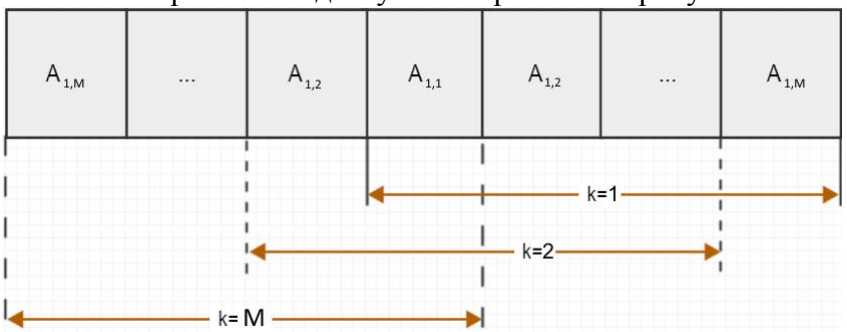


Рис. 2. Оптимизированный способ хранения блоков и схема доступа к строкам блоков.

3. Параллельная реализация и результаты численных экспериментов

Рассматривается модельная задача о восстановлении плотности в слое между глубинами 10 и 11 км для области размером 128×128 км^2. На рис. 3 изображено модельное гравитационное поле.

Гравитационное поле было получено путем решения прямой задачи гравиметрии по исходному модельному (синтетическому) распределению плотности $\bar{\sigma}$ (рис. 4, слева). В исходное поле добавлен шум с амплитудой 1%.

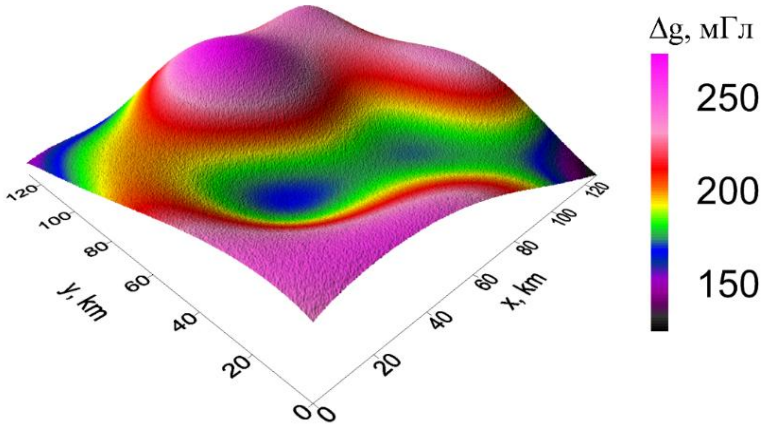


Рис. 3. Модельное (синтетическое) гравитационное поле.

На рис. 4 справа изображено восстановленное распределение плотности $\hat{\sigma}$. Задача решалась методом минимальных невязок. Параметр регуляризации брался равным $\alpha = 0{,}1$. Условием останова являлось $\varepsilon = 0{,}005$, для достижения потребовалось 5 итераций. Относительная погрешность вычислений составила $(\bar{\sigma} - \hat{\sigma})/\bar{\sigma} < 0{,}08\%$.

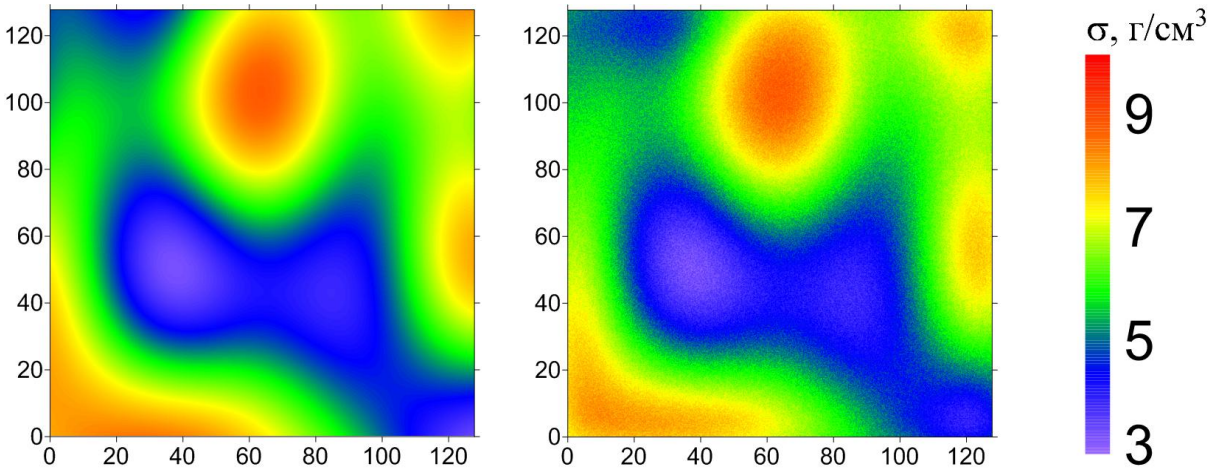


Рис. 4. Исходное (слева) и восстановленное (справа) распределения плотности.

Задача решалась двумя способами: с полным и оптимизированным хранением матрицы СЛАУ на узлах суперкомпьютера «Уран» с использованием восьмиядерных процессоров Intel Xeon E5-2660 (2,2 ГГц) с помощью гибридной технологии MPI+OpenMP. На каждом узле доступно не более 160 ГБ оперативной памяти.

Отметим, что для сеток размерности $2^9 \times 2^9$ хранение матрицы СЛАУ вышеописанным оптимизированным способом требует 2 ГБ оперативной памяти, т.е. достаточно использовать один узел. В случае полного хранения матрицы необходимо 525 ГБ, что превышает объем памяти одного узла, поэтому для решения задачи требуется несколько узлов.

Распараллеливание алгоритмов проводилось разбиением данных на фрагменты, число которых соответствует числу используемых узлов и ядер. В случае полного хранения матрица разбивалась горизонтальными полосами, и каждый фрагмент хранился на своем узле. В случае оптимизированного хранения дополненная первая строка блоков хранилась

— на каждом узле с целью сравнения времени счёта в одинаковых условиях,

— на одном узле, с целью оптимизации алгоритма под вычислительные ресурсы.

Внутри каждого узла проводилось распараллеливание с использованием OpenMP.

В таблице 1 представлены времена решения задачи для сетки размерности $2^9 \times 2^9$ и объёмы требуемой для запуска памяти. Прочерком обозначена нехватка памяти на узле. Подчеркнем, что главное преимущество разработанного алгоритма — это возможность

запуска на одном узле. В таблице 2 представлены времена решения этой же задачи оптимизированным способом на разных узлах.

Проведенные эксперименты показывают, что предложенный алгоритм весьма перспективен по нескольким причинам: во-первых, требует малый объём памяти ($O(MN^2)$ вместо $O(M^2N^2)$), поэтому отпадает необходимость использования нескольких узлов. Во-вторых, данные имеют удобную структуру, поэтому достигается некоторое ускорение счета за счет сокращения накладных расходов на работу с виртуальной памятью. В дальнейшем предполагается реализация данного алгоритма на графических процессорах NVIDIA и сопроцессорах Intel Xeon Phi с использованием технологий CUDA и OpenMP.

Таблица 1. Результаты численных экспериментов на нескольких узлах

Число узлов	Число ядер	Оптимизированное хранение (общая память 2 ГБ)		Полное хранение матрицы (общая память 525 ГБ)	
		Время, мин.	Требуемая память на узле, ГБ	Время, мин.	Требуемая память на узле, ГБ
1	8	53,9	0,25	—	66
2	16	13,4	0,12	—	33
4	32	6,8	0,06	7,9	16
8	64	3,5	0,03	4,8	8

Таблица 2. Результаты численных экспериментов с использованием одного узла

Узел	Количество ядер	Время счёта, мин.
2 x Intel Xeon E5450 (3.0 GHz, 4 ядра)	8	14,7
2 x Intel Xeon X5675 (3.07GHz, 6 ядер)	12	3,6
2 x Intel Xeon E5-2650 (2.6 GHz, 8 ядер)	16	1

Заключение

Построен эффективный параллельный алгоритм решения обратной задачи гравиметрии о восстановлении переменной плотности в слое, основанный на использовании структуры матрицы СЛАУ дискретизированного интегрального уравнения. Предложенный алгоритм позволяет существенно сократить затраты памяти на хранение матрицы, а также уменьшить расходы вычислительных ресурсов и время решения задачи. Проведено распараллеливание и реализация алгоритма на узлах суперкомпьютера «Уран». Решена задача о нахождении плотности в слое по синтетическим данным.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №15-01-00629а).

Список литературы

1. *Мартышко П.С., Пруткин И. Л.* Технология разделения источников гравитационного поля по глубине // Геофизический журнал. 2003. Т. 25. №3. с. 159–168.

2. *Акимова Е. Н., Гемайдинов Д. В.* Параллельные алгоритмы решения задачи гравиметрии о восстановлении плотности в слое // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2007. Т. 13. N 3. с. 3–21.

3. *Мартышко П. С., Васин В. В., Акимова Е. Н., Пьянков В. А.* О комплексной интерпретации гравитационных и магнитовариационных данных (на примере Башкирского предуралья) // Геофизика. 2011. N 4. с. 30–36.

4. *Лаврентьев М. М.* О некоторых некорректных задачах математической физики. Новосибирск: Наука. 1962. 96 с.

5. *Васин В. В., Еремин И. И.* Операторы и итерационные процессы Фейеровского типа. Теория и приложения // Екатеринбург. 2005. 200 с.

УДК 622.2

МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТИТАНОМАГНЕТИТОВ

В.А. Антонов, *Antonov@igduran.ru*
Институт горного дела УрО РАН, г Екатеринбург, Россия

Аннотация. Изложен метод комплексной геопространственной оценки качества ванадийсодержащей титаномагнетитовой руды. Данным методом на основе геофизических измерений выделяются в геопространстве ее участки по предложенному признаку – комплексному экономическому показателю. Этот показатель выражает интегрированное воздействие параметров руды на относительную прибыль, получаемую в итоге ее добычи, обогащения и реализации полученной продукции. Картирование качества магнетитовой руды по данному методу повышает эффективность ее геофизических исследований и последующей добычи.

THE METHOD OF COMPLEX GEOSPATIAL ASSESSMENT THE QUALITY OF TITANOMAGNETITES

V.A. Antonov, *Antonov@igduran.ru*
The Institute of Mining UB RAS, Yekaterinburg, Russia

Abstract. The method of complex geospatial assessment of quality vanadium titan magnetite ore. This method based on geophysical measurements are highlighted in the geospace her parcels on the proposed symptom - complex economic indicator. This indicator expresses the integrated impact parameters of ore on the relative profits at the end of its production, enrichment and realization of the final product. Mapping quality magnetite ore according to this method increases the efficiency of geophysical research and subsequent production.

Введение. Минерально-сырьевым источником получения железа в Уральском регионе являются не богатые (16-18 % *Fe*), но крупные по запасам месторождения, например, Гусевогорское, Качканарское, малотитанистой ванадийсодержащей магнетитовой руды. Для освоения обозначенных месторождений важна геопространственная оценка качества магнетитов, определяющая по набору их химических и структурных параметров на выделенном участке возможную эффективность технологической переработки руды и реализации полученной продукции. Параметры руды влияют на продуктивность горного производства по-разному. Изменения содержания железа $C_{Fe\text{м}}$, связанного с магнетитом, 8-12,5 %, а также размера d вкрапленных зерен магнетита 0,01-8 мм в значительной степени влияет на эффективность дробления руды и последующей магнитной сепарации. Это приводит к соответствующим изменениям себестоимости обогащения. Содержащийся в руде пентоксид ванадия C_V 0,08-0,25 %, и диоксид титана C_{Ti} 0,5-2 % из-за изоморфной и минералогической связи с магнетитом переходит в концентрат и выходную продукцию. Здесь ванадий является ценным компонентом, поскольку в дальнейшем процессе металлургической переработки выходной продукции попутно извлекается из образующихся шлаков как самостоятельный продукт назначения. В то время как титан является вредной тугоплавкой примесью, осложняющей металлургическую переработку.

На стадии эксплуатационной разведки рудные параметры определяются экспрессными геофизическими и геологическими методами опробования магнетитов в естественном залегании. Добычу руды ориентируют главным образом на участки горизонтального плана распределения содержания железа $C_{Fe\text{м}}$, построенного по результатам соответствующих магнитных измерений. Для дополнительной ориентации, используя данные рентгеноспектрального и структурного анализа горных пород, создаются раздельные планы распределений в геопространстве других упомянутых рудных параметров C_V, C_{Ti}, и d [1]. Однако при координированном совмещении этих планов в комплексной интерпретации качества руды возникает непреодолимое затруднение. Оно состоит в том, что совокупность

значений раздельно картированных рудных параметров не дает целостного представления о совместном их влиянии на эффективность ее дальнейшего обогащения и реализацию полученной продукции, определяющих конечный экономический результат добычи руды на выделенном участке.

Для решения отмеченной проблемы предлагается метод комплексной геопространственной оценки качества титаномагнетитов. Метод включает в себя совокупность следующих приемов и операций. Формируется математическая модель комплексного экономического показателя руды (КЭПр) как функция ее качества, определяющая по набору рудных параметров относительный результат добычи, переработки руды и реализации полученной продукции. Проводится расчет показателя КЭПр в координированных узловых точках геопространства по данным геофизических и геологических измерений рудных параметров. По метрической матрице узловых точек строится картографическая модель качества руды, показывающая распределение показателя КЭПр в геопространстве залежи титаномагнетитов.

Математическая модель КЭПр. Модель отображает в относительном виде зависимость конечного экономического результата горно-обогатительного производства от основных рудных параметров. В связи с этим определено, что КЭПр - это отношение условной прибыли П, полученной от реализации продуктов обогащения (концентрата, агломерата, окатышей) руды, поступившей на передел с естественными параметрами по содержаниям окисей титана C_{Ti}, ванадия C_V, железа $C_{Fe\text{м}}$ и размеру вкраплений магнетита d, к условной прибыли $П_о$, полученной от реализации таких же продуктов обогащения руды, поступившей на передел с соответствующими параметрами $C_{Ti\text{о}}$, $C_{V\text{о}}$, $C_{Fe\text{мо}}$, $d_о$ нормальной кондиции. Здесь под нормальной кондицией понимается обоснованный набор рудных параметров, усредненных по объему естественного залегания руды и обеспечивающих устойчивую ее переработку и плановый выход готовой продукции. Это руда мало титанистая, средняя по вкрапленности и обогатимости. Таким образом, КЭПр выражается соотношением функции $П(C_{Ti}, C_V, C_{Fe\text{м}}, d)$ к ее частному значению $П_о$

$$\text{КЭПр} = \frac{П(Ti, V, Fe_м, d)}{П_0(Ti_0, V_0, Fe_{м_0}, d_0)}. \qquad (1)$$

На цену Ц концентрата, агломерата и окатышей предусмотрено влияние содержаний в руде окисей титана C_{Ti} и ванадия C_V. Себестоимость обогащения $С_{об}$ руды зависит от содержания в ней железа $C_{Fe\text{м}}$ и размера вкраплений магнетита d. Положив себестоимость добычи руды $С_{доб}$ условно постоянной величиной, выразим прибыль разностью

$$П = Ц(Ti, V) - С_{об}(Fe_м, d) - С_{доб}. \qquad (2)$$

Зависимость цены Ц и себестоимости $С_{об}$ от рудных параметров выразим в относительном виде функциями влияния, соответственно, $Ф_{Ti}$, $Ф_V$ и $Ф_{Fe\text{м}}$, $Ф_d$

$$Ц(Ti, V) = Ц_0(1 + Ф_{Ti})(1 + Ф_V); \qquad (3)$$

$$С_{об}(Fe_м, d) = С_{об.о}(1 + Ф_{Fe\text{м}} + Ф_d), \qquad (4)$$

где $С_{об.о}$ и $Ц_о$ – себестоимость обогащения и цена выходной продукции, полученные по результатам переработки руды с параметрами нормальной кондиции. Функции Ф обращаются в нуль при соответствующих равенствах: $C_{Ti}=C_{Ti\text{о}}$, $C_V=C_{V\text{о}}$, $C_{Fe\text{м}}= C_{Fe\text{мо}}$, $d = d_о$. Влияние C_{Ti} и C_V в расчетах цены взаимно дополняющее, а $C_{Fe\text{м}}$ и d в расчетах себестоимости - взаимно компенсирующее. Поэтому в выражении (3) факторы влияния умножаются, а в формуле (4) – суммируются.

Выразим отношения себестоимостей обогащения и добычи руды с нормальной кондицией, а также суммарной себестоимости и цены выходной продукции, полученные по результатам ее переработки, с помощью отраслевых коэффициентов K и ε

$$\frac{С_{об.о} + С_{доб.о}}{Ц_о} = K; \qquad \frac{С_{об.о}}{С_{доб.о}} = \varepsilon. \qquad (5)$$

Преобразуем выражение КЭПр (1) с учетом соотношений (2) – (5) к следующему

функциональному виду

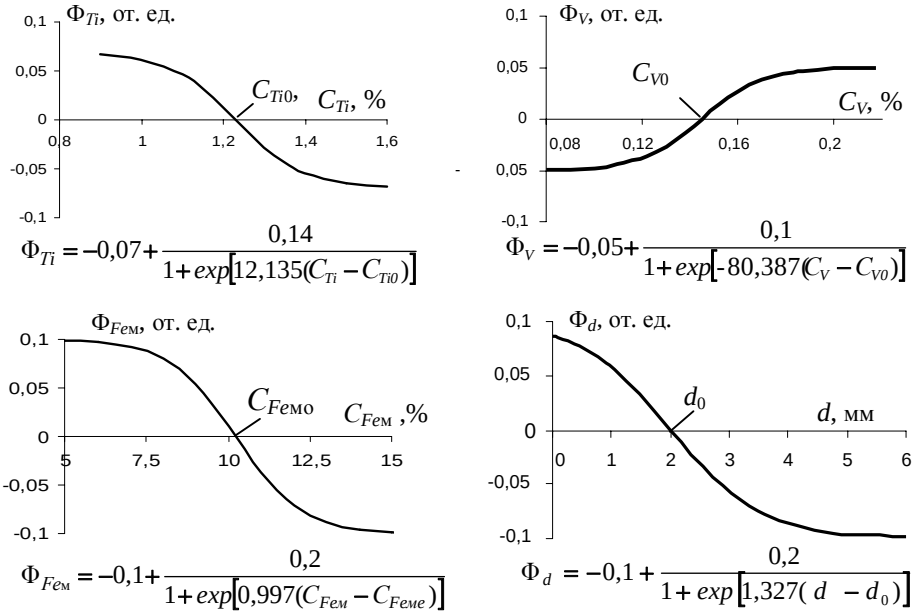
$$\text{КЭПр} = \frac{(1+\Phi_{Ti})(1+\Phi_V) - K(1+\varepsilon)^{-1}\left[\varepsilon(1+\Phi_{Fe\text{м}}+\Phi_d)+1\right]}{1-K}. \qquad (6)$$

Приведем формулу (6) к конкретному расчетному состоянию на примере оценки качества титаномагнетитов Гусевогорского месторождения. Учитывая технико-экономические показатели горного производства [2], положим следующие значения коэффициентов: K =0,65 и ε=3. Возможные интервалы влияния рудных параметров на экономические показатели, согласно технологическим наблюдениям [3-5] и предварительным экспертным оценкам, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Интервалы изменения параметров руды и функций их влияния

	Руда с параметрами ниже нормальной кондиции КЭПр < 100 %	Руда с параметрами нормальной кондиции КЭПр = 100 %	Руда с параметрами выше нормальной кондиции КЭПр > 100 %
Φ_{Ti}	1,23 % < $C_{Ti} \le$ 1,6 %. Ц снижается на 7 % $-0{,}07 \le \Phi_{Ti} < 0$	C_{Ti0} = 1,23 %, Ц= Ц$_0$ Φ_{Ti} =0	0,9 % $\le C_{Ti}$ < 1,23 %. Ц повышается на 7 % $0 < \Phi_{Ti} \le 0{,}07$
Φ_V	0,1 % $\le C_V$ < 0,145 % . Ц снижается на 5 % $-0{,}05 \le \Phi_V < 0$	C_{V0} =0,145 % Ц= Ц$_0$ Φ_V =0	0,145 % < $C_V \le$ 0,2 %. Ц повышается на 5 % $0 < \Phi_V \le 0{,}05$
$\Phi_{Fe\text{м}}$	8,25 % $\le C_{Fe\text{м}}$ < 10,21 %. С$_{об}$ повышается на 10 % $0 < \Phi_{Fe\text{м}} \le 0{,}1$	C_{Fe0} = 10,21 % С$_{об}$= С$_{об0}$ $\Phi_{Fe\text{м}}$ =0	10,21 % < $C_{Fe\text{м}} \le$ 11,73 %. С$_{об}$ снижается на 10 % $-0{,}1 \le \Phi_{Fe\text{м}} < 0$
Φ_d	0,075 мм $\le d <$ 2 мм. С$_{об}$ повышается на 10 % $0 < \Phi_d \le 0{,}1$	d_0 = 2 мм С$_{об}$= С$_{об0}$ Φ_d =0	2 мм < $d \le$ 5 мм. С$_{об}$ снижается на 10 % $-0{,}1 \le \Phi_d < 0$

Функции влияния выразим уравнениями нелинейной регрессии квазиступенчатого вида, построенными по данным таблицы 1 с помощью известной компьютерной программы «Тренды ФСП-1». Выражения функций и их графики показаны на рис. 1.



$$\Phi_{Ti} = -0{,}07 + \frac{0{,}14}{1+exp\left[12{,}135(C_{Ti}-C_{Ti0})\right]}$$

$$\Phi_V = -0{,}05 + \frac{0{,}1}{1+exp\left[-80{,}387(C_V-C_{V0})\right]}$$

$$\Phi_{Fe_M} = -0{,}1 + \frac{0{,}2}{1+exp\left[0{,}997(C_{Fe_M}-C_{Fe_M e})\right]}$$

$$\Phi_d = -0{,}1 + \frac{0{,}2}{1+exp\left[1{,}327(d-d_0)\right]}$$

Рис. 1. Функции влияния и их графики.

После подстановки в равенство (6) значений коэффициентов и математических выражений функций влияния получим следующую формулу, по которой рассчитывается показатель качества руды КЭПр

$$\text{КЭПр} = 1{,}53\left[\left(0{,}93 + \frac{0{,}14}{1 + exp\left[39{,}56(\ C_{Ti} - C_{Ti0}\ )\right]}\right)\left(0{,}95 + \frac{0{,}1}{1 + exp\left[-80{,}387(\ C_V - C_{V0}\ )\right]}\right) - 0{,}65\left(0{,}8 + \frac{0{,}2}{1 + exp\left[0{,}997(\ C_{Fe\,м} - C_{Fe\,ме}\ )\right]} + \frac{0{,}2}{1 + exp\left[1{,}327(\ d\ - d_0\ )\right]}\right)\right]. \quad (7)$$

Аргументами функции КЭПр является набор рудных параметров C_{Ti}, C_V, $C_{Fe\text{м}}$, d. Функция обладает свойствами гладкости, непрерывности и однозначности. Еще отметим ее важное свойство эквивалентности, выражающее комплексное, т.е. совместное сбалансированное влияние на качество руды всех обозначенных параметров. Это свойство проявляется в сохранении значений КЭПр при разнонаправленном действии аргументов, например, снижении $C_{Fe\text{м}}$, и увеличении d или снижениях C_{Ti} и C_V.

Распределение КЭПр в геопространстве. Построим горизонтальный план распределения КЭПр в массиве титаномагнетитов на примере Гусевогорского месторождения. В качестве узловых точек, используемых для моделирования плана, примем расчеты КЭПр, проведенные по формуле (7) с использованием результатов геофизических определений рудных параметров в горизонтальных координатах X, Y геопространства. Распределение показателя КЭПр в узловых точках показано на рис. 2*а*.

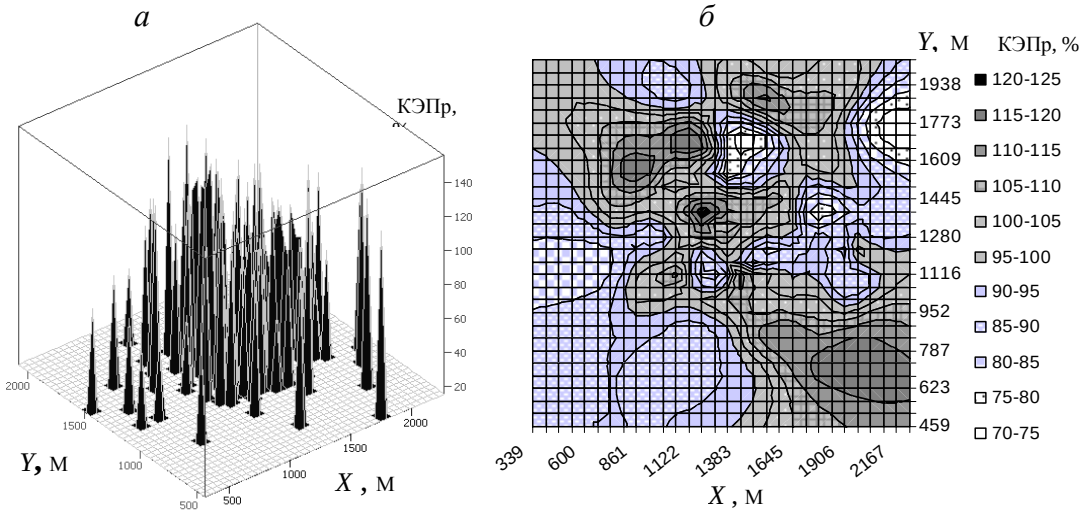


Рис. 2. Распределения показателя КЭПр на горизонте титаномагнетитов, полученные по результатам геофизических определений рудных параметров в узловых точках (*а*) и последующего моделирования плана (*б*).

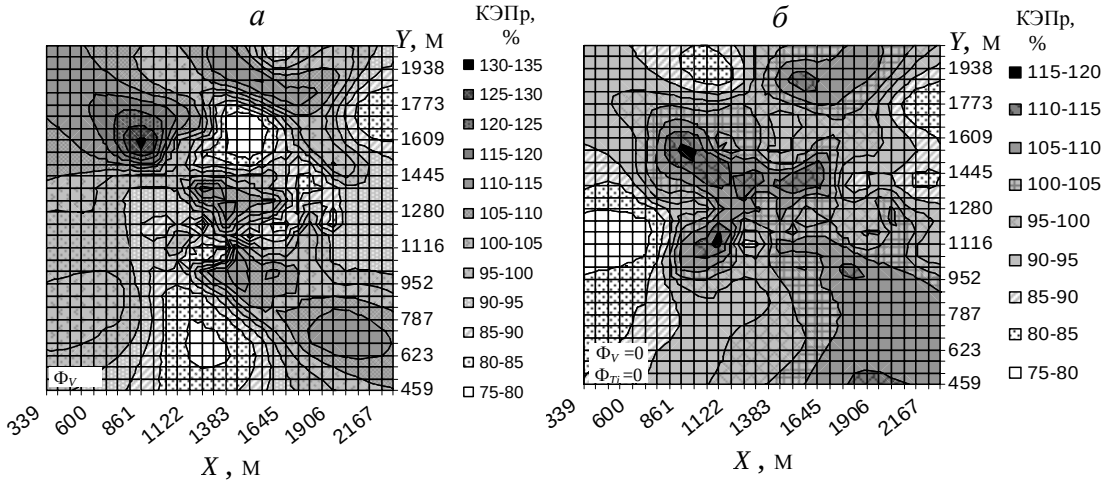


Рис. 3. Планы распределения показателя КЭПр на горизонте титаномагнетитов без учета влияний: ванадия (*а*); ванадия и титана (*б*).

План распределения КЭПр построим кригинг-интерполяцией. Соответствующие цифровые расчеты проведем в углах сетки с относительным размером 30х30. Предварительно установлено, что пространственная корреляция показателя КЭПр в узловых точках изотропна. Его полувариограмма достаточно близко аппроксимируется функцией Гаусса с радиусом корреляции равным 6 единиц сетки. План, полученный в результате расчетов, представлен на рис. 2*б*.

На плане отображаются особенности распределения показателя КЭПр на горизонте титаномагнетитов. Участки с разными значениями показателя ограничены изолиниями. Качество руды на участках со значениями КЭПр от 95 % до 105 % обеспечивает получение прибыли от реализации выходной продукции, соответствующей установленной норме. Качество руды на других участках плана, где значения показателя КЭПр больше 105 % или меньше 95 % обеспечивает получение, соответственно, большей или меньшей прибыли. Участки руды с повышенным показателем КЭПр расположены преимущественно на северо-западе и юго-востоке плана. Руда с низким КЭПр расположена на северо-восточных и юго-западных участках.

В связи с изменчивостью торгового рынка, возможно, что в некоторый период горно-обогатительного производства учитывать влияние титана и ванадия на ценообразование выходной продукции не целесообразно из-за сложившейся экономической конъюнктуры. Тогда в формулах (6) и (7) при расчете КЭПр в узловых точках следует положить соответствующие функции влияния равными нулю: Φ_{Ti},=0, Φ_V=0. Планы показателя качества руды КЭПр на горизонте титаномагнетитов, полученные при данных условиях, показаны на рис. 3.

Сравнивая планы, представленные на рис 2 и рис. 3, отметим, что на западном участке плана, построенного без учета ванадия, показатель КЭПр существенно повышается. На этом же участке плана, построенного без совместного учета ванадия и титана, показатель КЭПр понижается. Это объясняется тем, что содержание ванадия и титана в магнетитах этого участка ниже нормальной кондиции.

Заключение. Методом комплексной геопространственной оценки качества ванадийсодержащих малотитанистых магнетитов, как показано на примере Гусевогорского месторождения, выделяются в геопространстве ее участки по новому признаку - показателю КЭПр, выражающему интегрированное воздействие параметров руды на относительную прибыль, получаемую в итоге ее добычи, обогащения и реализации полученной продукции. Модель КЭПр обобщенного вида (6) допускает подстановку в нее разных значений коэффициентов K, ε и функций влияния Φ_{Ti}, Φ_V, $\Phi_{Fe\text{ем}}$, Φ_d в зависимости от особенностей технологических режимов добычи и дробильно-обогатительного передела руды, а также стратегии ценообразования выходной продукции. В связи с этим интервалы изменения параметров руды и зависимых экономических величин, представленные в таблице 1, могут быть скорректированы. Последующие вычислительные операции легко выполняются современными компьютерными технологиями. Таким образом, расчетная модель (7) является лишь частным случаем выражения КЭПр. Тем не менее, представленные планы распределения показателя КЭПр показывают, что картирование качества магнетитовой руды данным методом повышает эффективность использования ее геофизических исследований и последующей добычи.

Список литературы

1. В.Л. Яковлев. Геоинформационная оценка изменчивости качества титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения. / Яковлев В.Л., Лаптев Ю.В., Яковлев А.М. // Литосфера № 5. 2014. С.122-128.
2. Сборник технико-экономических показателей горных предприятий Урала за 1990-2000 гг. / Екатеринбург: ИГД УрО РАН. 2001. С. 23.
3. А.К. Порцевский. Управление качеством рудной массы на открытых горных работах. // Москва: МГГА. 1998. 44 с.
4. А.Н. Дмитриев. Исследование титаномагнетитовых руд и концентратов ОАО «ЕВРАЗ КГОК» / Дмитриев А.Н., Петухов Р.В., Корнилков С.В.и др. // Технологическая платформа «Твердые полезные ископаемые»: технологические и экологические проблемы отработки природных и техногенных месторождений: доклады научн.-практ. конф. 1-2 октября 2013 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН. 2013. С.28-34.
5. Раздельная переработка проб руды Гусевогорского месторождения: отчет о НИР по х/д № 01/07/-12И / Под рук. Пелевина А.Е. ООО «Техногенпроект». 2012. 20 с.

УДК 551.372

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ МОНИТОРИНГОВЫХ ДАННЫХ

Е.А. Баталева, *bataleva@gdirc.ru*
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г.Бишкеке, г. Бишкек, Киргизская Республика

Установлено, что для вариаций компонент тензора импеданса и их трансформант на корреляционных полярных диаграммах существуют области (кластеры) устойчивой корреляции, которые являются интегральной мерой взаимосвязи вариаций электромагнитных параметров с деформациями дневной поверхности: лунно-солнечными приливными воздействиями и изменениями длин базовых геодезических линий. Морфология кластеров, по-видимому, связана с геоэлектрической структурой пунктов мониторинга.

CORRELATION ANALYSIS OF MONITORING DATA

E.A. Bataleva, *bataleva@gdirc.ru*
The Federal State Budgetary Institution of Science - Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek city. Bishkek, Kyrgyz Republic,

It is established that for variations a component of a tensor of an impedance and their transformant on correlation polar charts there are areas (clusters) of steady correlation which are an integrated measure of interrelation of variations of electromagnetic parameters with deformations of a day surface: lunisolar tidal influences and changes of lengths of basic geodetic lines. The morphology of clusters is apparently connected with geoelectric structure of points of monitoring.

Высокая чувствительность параметров электромагнитного поля к влиянию геодинамических процессов позволяют широко использовать электромагнитные методы при мониторинговых наблюдениях, о чем свидетельствуют работы, проводимые на Ашхабадском, Гармском, Бишкекском и др. прогностических полигонах [1,7,8]. Следует отметить, что для успешной интерпретации мониторинговых данных принципиально важными являются два момента – точность оценки вариаций электромагнитных параметров [9] и выбор наиболее чувствительного параметра к влиянию геодинамических процессов [2, 3]. Поэтому основной целью данной работы является изучение степени взаимосвязи между временными рядами вариаций (отклонения от среднего) всех компонент тензора импеданса, лунно-солнечными приливными воздействиями и изменениями длин базовых геодезических линий в предположении, что корреляция временных рядов отражает связь этих процессов.

Магнитотеллурический мониторинг на Бишкекском геодинамическом полигоне выполняется измерительными станциями Феникс MTU-5D, регистрация данных осуществляется круглосуточно в интервале периодов 0,01-1000 с. В исследованиях, связанных с развитием принципиально новой методики азимутального магнитотеллурического мониторинга, рассматривались временные ряды вариаций (отклонения от среднего) для электромагнитных параметров среды по азимутам 0° - 180° в зависимости от периода зондирования [2-4, 9]. Такой формат представления данных обеспечивал рассмотрение на одном графике зависимостей вариаций компонент тензора импеданса сразу от трёх параметров - времени, периода зондирования и азимута. Корреляционные связи между приливными воздействиями и изменениями электромагнитных параметров, которые служат критерием оценки тензочувствительности пункта зондирования, представлялись в виде прямоугольных диаграмм распределения коэффициентов корреляции (r) в зависимости от периода МТ-зондирования и азимута [5-9]. Корреляционные зависимости между временными рядами «x» и «y» вычислялись по формуле (1):

$$r = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}}{\sqrt{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right) \cdot \left(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}\right)}} \quad (1)$$

Оценка точности выполняемых процедур производилась с использованием контрольных зондирований двумя станциями Феникс MTU-5D в одном пункте наблюдения. Электрические диполи измерительных установок были установлены параллельно друг другу со смещением 1.5 метра, синхронизация зондирований осуществлялась по GPS-часам. Среднее квадратичное отклонение от среднего вариаций кажущегося сопротивления для азимутов - 0°-180° составляло не более 1 Ом·м (0.5%) для периодов в интервале 0.1-2.5 с и до 4 Ом·м (2%) на периодах до 100 с [9].

Для оценки тензочувствительности участков мини-полигона Кентор рассматривались корреляционные диаграммы следующих временных рядов: вариаций кажущегося сопротивления, фаз импеданса, компонент тензора импеданса (ReZxx, ImZxx, ReZxy, ImZxy) в сопоставлении с временными рядами лунно-солнечных приливов и изменениями длин базовых линий (рис. 1). Формирование указанных временных рядов вариаций МТ-параметров производилось по следующей схеме: 1) обработка записей МТЗ с помощью программы SSMT-2000 (Phoenix Geophysics) и вычисление значений частотных зависимостей тензора импеданса для 48 непересекающихся часовых интервалов в диапазоне периодов от 0.01 до 100 с (общая длительность МТ-записи на мини-полигоне Кентор - двое суток); 2) пересчёт значений тензора импеданса на сетку азимутов через 15 градусов. В результате полученный массив экспериментальных данных включал в себя значения компонент тензора импеданса для 48 интервалов длительностью по одному часу в диапазоне периодов от 0.01 до 100 с и диапазоне азимутов – от 0° до 360°. Временная динамика вариаций МТ-параметров, вычисленных для всей совокупности периодов и азимутов, представляет наибольший интерес в данной работе.

Схема расположения пунктов мониторинга мини-полигона Кентор представлена на рисунке 1. На том же рисунке, в качестве примера, приведены диаграммы корреляции вариаций кажущегося сопротивления (dRo) в интервале периодов от 0.01 до 100 секунд с северной компонентой лунно-солнечных приливных воздействий (Av), рассчитанной с помощью программы «Tide.exe» в пункте ФТ-0, и изменениями длин базовых линий между пунктами К5 и К2, полученными по результатам светодальномерных наблюдений. Распределения описанных выше коэффициентов корреляции в полярных координатах имеют схожий характер при относительно небольших значениях 0.35-0.5.

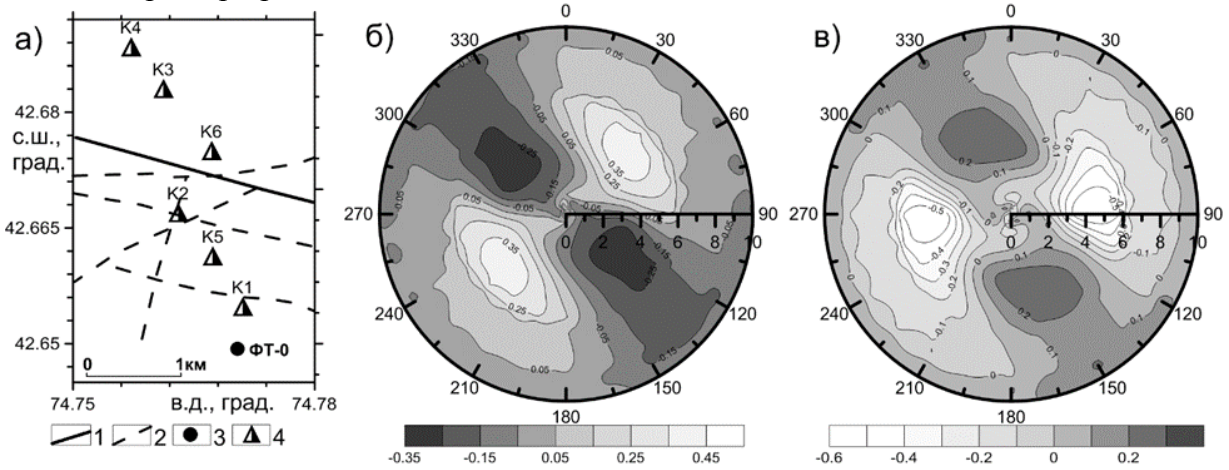


Рис. 1. Корреляционные полярные диаграммы для участка миниполигона Кентор: а) – схема расположения пунктов мониторинга и разломы: 1 – Шамсинский региональный разлом, 2 – локальные разломы, 3 – пункт МТ-мониторинга, 4 – пункты светодальномерных наблюдений. Корреляционные диаграммы для вариаций кажущегося сопротивления (dRo) в пункте ФТ-0 и: б) – северной компонентой лунно-солнечных приливных воздействий (Av), в)

– изменений длин базовых линий между пунктами K5 и K2 по результатам светодальномерных наблюдений, описание диаграмм дано в тексте

На корреляционных полярных диаграммах рисунка 1 выделяются области (кластеры) устойчивой корреляции, которые являются интегральной мерой взаимосвязи вариаций электромагнитных параметров с приливными воздействиями и изменениями длин базовых линий. Морфология и расположение кластеров (без учёта знака) дают дополнительную характеристику деформационного процесса, проявления которого связаны с рассматриваемыми вариациями физических параметров геосреды. Так, результаты магнитотеллурического мониторинга для пунктов, расположенных в различных геолого-тектонических условиях в межгорных впадинах Тянь-Шаня (Кочкорской, Нарынской, Аксайской) и вблизи зоны Таласо-Ферганского разлома, свидетельствуют о том, что положение кластеров на корреляционных полярных диаграммах связано с геоэлектрической структурой пункта наблюдения и соответствует ориентации основных тектонических элементов вблизи этого пункта.

В работе [6] в качестве основной причины изменений активного электросопротивления в геологической среде, рассматривалось перераспределение флюидов в порово-трещинном пространстве горных пород в связи с деформационными процессами. Вероятно, этот механизм в формировании вариаций электросопротивления не является единственным. Попробуем рассмотреть механизм формирования вариаций активной и реактивной составляющих электросопротивления. Для этого впервые был выполнен корреляционный анализ реальных и мнимых частей компонент тензора импеданса с характеристиками деформаций дневной поверхности: лунно-солнечными приливами и изменениями длин базовых геодезических линий. Оценка вклада каждой составляющей электросопротивления (активной и реактивной) в формирование вариаций электропроводности весьма актуальна для развития методики магнитотеллурического мониторинга. При этом особое внимание должно уделяться роли и информативности дополнительных импедансов в выявлении тензочувствительных зон.

По аналогии с методом импедансной спектроскопии [10] рассмотрим реальные и мнимые компоненты импедансов, зависимость которых от емкостных и индуктивных характеристик отражают формулы (2) и (3), и сопоставление которых с временными рядами лунно-солнечных приливов и изменениями длин базовых геодезических линий позволило оценить соотношение изменений активного и реактивного сопротивлений в наблюдаемых вариациях.

$$\mathrm{Re}\,Z = \frac{\frac{L}{C}R - \frac{R}{\omega C}\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2) \qquad \mathrm{Im}\,Z = \frac{-\frac{R^2}{\omega C} - \frac{L}{C}\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (3),$$

где Z – импеданс; R – активное сопротивление; $\omega = 2\pi f$; $j\omega L$ – реактивное сопротивление индуктивности; $j\omega C$ – реактивная проводимость конденсатора, (j – мнимая единица).

Анализ поведения дополнительных импедансов, характеризующих степень геоэлектрической неоднородности среды, результаты которого показаны на рисунке 2 позволил (на примере данных с мини-полигона Кентор) определить их роль для оценки тензочувствительности пунктов наблюдения. На рисунке 2 показано распределение значений коэффициентов корреляции временных рядов вариаций реальных и мнимых компонент основных и дополнительных импедансов с временными рядами изменений длин базовых линий и лунно-солнечных приливов для пункта наблюдения ФТ-0. Очевидно, что значения коэффициентов корреляции между временными рядами мнимых частей импедансов и временными рядами приливных воздействий и деформаций, соизмеримы с таковыми для реальных частей импедансов.

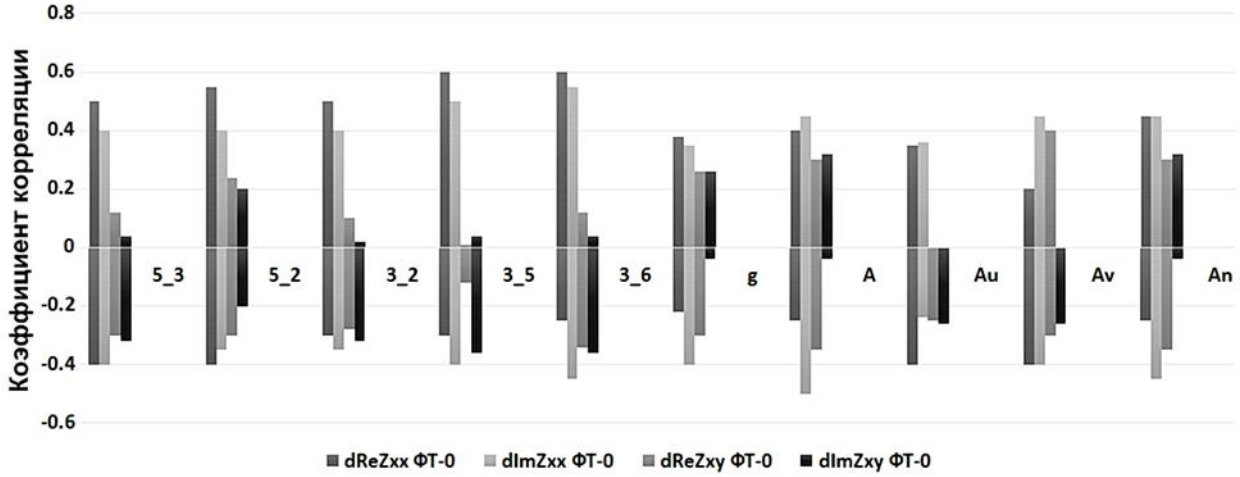


Рис. 2. Распределение значений коэффициентов корреляции между вариациями реальной dReZxx и мнимой dImZxx частями дополнительного импеданса, реальной dReZxy и мнимой dImZxy частями основного импеданса с изменениями длин базовых линий, цифрами обозначены номера пунктов (рис. 1а), между которыми измерялось расстояние и приливными воздействиями (g – горизонтальная компонента, A – полный вектор, Au – восток-запад, Av – север-юг, An – вертикальная компонента)

Этот факт свидетельствует о том, что вариации реактивной составляющей электросопротивления (рис.3), связанные с изменениями ёмкостных (и возможно индуктивных) характеристик массивов горных пород в естественном залегании при деформационных процессах, реагируют на приливные воздействия и деформации также, как и вариации активной составляющей электросопротивления.

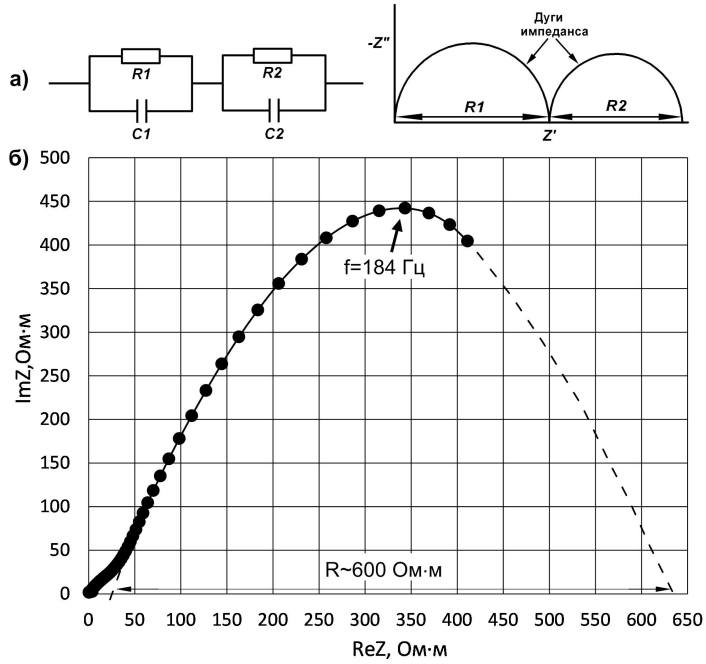


Рис. 3. Диаграммы Арганда (спектры импеданса) для: а) – двух RC- цепочек; б) – для экспериментального магнитотеллурического импеданса с пункта «0» миниполигона Кентор. Пунктиром показано предполагаемое завершение правой части дуги, симметричное её левой части.

Вблизи начала координат (в диапазоне 0-50 Ом·м по осям реального и мнимого импеданса), по-видимому, расположена вырожденная дуга. Максимальное значение правой дуги диаграммы достигается при частоте f = 184 Гц. Активное сопротивление, определённое по пересечению диаграммы Арганда с осью реального импеданса, составляет около 600

Ом·м. Значение ёмкости можно получить из уравнения для максимального значения частоты, из которого - и подставляя значения имеем: С=1.44 мкФ.

Таким образом, в результате анализа электромагнитных параметров среды на предмет выявления их взаимосвязи с лунно-солнечными приливными воздействиями и деформациями дневной поверхности, установлено, что характер этой взаимосвязи зависит от геоэлектрической структуры пункта зондировани. Предложен новый подход к представлению результатов корреляционного анализа данных магнитотеллурического мониторинга в системе полярных координат. На корреляционных полярных диаграммах выделены области (кластеры) устойчивой корреляции, которые являются интегральной мерой взаимосвязи вариаций электромагнитных параметров с деформациями дневной поверхности. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что положение кластеров на корреляционных полярных диаграммах связано с геоэлектрической структурой пункта наблюдения и соответствует ориентации основных тектонических элементов в окрестности этого пункта. Выполнена оценка информативности дополнительных импедансов, на основании чего сделан вывод о необходимости использования данного параметра для оценки тензочувствительности пунктов наблюдения. Результаты анализа активной и реактивной составляющих сопротивления могут быть использованы для развития новых представлений о механизмах формирования вариаций электросопротивления геосреды.

Список литературы

1. Барсуков О.М., Сорокин О.Н. Изменение кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном регионе // Физика Земли. 1973. № 10. С.100-102.
2. Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов // Физика Земли. 2013. № 3. С. 105-113.
3. Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженного состояния среды // Геофизические исследования. 2014. Т.15, № 4. С. 54-63.
4. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга Часть 1. Анализ данных магнитотеллурического мониторинга // Вестник КРСУ. Бишкек. 2014. Т.14. №7. С. 3-7.
5. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга Часть 2. Разработка программного обеспечения для анализа данных МТ мониторинга // Вестник КРСУ. Бишкек. 2014. Т.14. №7. С. 8-12.
6. Брагин В.Д., Мухамадеева В.А. Изучение вариаций анизотропии электрического сопротивления в земной коре на территории Бишкекского геодинамического полигона // В сб. Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы. Москва-Бишкек. 2009. С.74-84.
7. Землетрясения и процессы их подготовки / Ред. В. Н. Страхов. М., Наука, 1991. 154 с.
8. Рыбин А.К., Спичак В.В., Баталев В.Ю., Матюков В.Е. Площадные магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2008. Т.49. №5. С. 445-460.
9. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня // Вестник КРСУ. 2011. Том 11. №4. С.29-40.
10. Barsoukov E., Macdonald J.R. Impedance spectroscopy: theory, experiment and application / Willey, N.Y. 2005. 595 p.

УДК 550.8:553.08:53/54

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИИ МИКРОВОЛН ПРИ АНАЛИЗЕ ВЕЩЕСТВА (НА ПРИМЕРЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОКСИДА ХРОМА В РУДЕ)

***В.В. Бахтерев**, ugv@bk.ru*
Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Использована энергия микроволн для нагрева образцов хромитовой руды. Выявлена связь между температурой нагрева образца и содержанием оксида хрома. Для высокохромистой руды магнезиального типа она имеет вид $P(Cr_2O_3, \%) = 132{,}26 - 21{,}55 + \ln T$; $R^2 = 0{,}88$.

THE EXPERIENCE OF USING THE ENERGY OF MICROWAVES IN THE ANALYSIS OF SUBSTANCES (FOR EXAMPLE, DETERMINATION OF CHROMIUM OXIDE IN THE ORE)

***V.V Bakhterev**, ugv@bk.ru*
Institute of Geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Used the energy of the microwaves for heating chromite ore samples. Identified the relationship between the heating temperature of the sample and the content of chromium oxide. For high-chromium ore magnesia type it has the form $P(Cr_2O_3, \%) = 132{,}26 - 21{,}55 \ln T$; $R^2 = 0{,}88$.

Введение. Микроволновым излучением принято называть неионизирующее электромагнитное излучение с частотой от 300 МГц до 300 ГГц. Такое излучение вызывает движение молекул за счет перемещения ионов и вращения диполей, но не приводит к изменению в структуре молекул [1].

Взаимодействие микроволнового излучения с веществом может сопровождаться его отражением, поглощением и прохождением через объем образца без ослабления. По характеру взаимодействия с микроволновым излучением материалы можно разделить на три группы. Проводники, поверхность которых полностью отражает микроволновое излучение. При этом металл не нагревается, так как потерь энергии в его объеме практически нет. Диэлектрики, пропускающие микроволновое излучение через свой объем практически без изменений (таковыми являются, например, полиэтилен, плавленый кварц, фарфор и др.). Наконец, диэлектрики, при прохождении через объем которых происходит поглощение микроволнового излучения, сопровождающееся, в частности, разогревом образцов. Такими диэлектриками является большинство минералов и горных пород.

При наложении микроволнового поля движение диполей (полярных молекул или иных обособленных групп атомов) приобретает определенную ориентацию, связанную с характером налагаемого поля. «Когда интенсивность поля уменьшается, возникшая ориентация исчезает и хаотичность вращательного (и колебательного) движения молекул восстанавливается, при этом выделяется тепловая энергия. При частоте 2,45 ГГц ориентация диполей молекул и их разупорядочение может происходить несколько миллиардов раз в 1 с, что и приводит к быстрому разогреву образца» [1].

В настоящее время теория взаимодействия микроволнового излучения с диэлектриками пока еще не достигла такой степени развития, которая позволила бы заранее предсказать, будет или нет наблюдаться заметное поглощение поля диэлектриком. Поэтому необходимы обширные исследования по изучению воздействия микроволнового излучения на различные среды.

В работе автора [2] показана принципиальная возможность оценки содержания оксида хрома в руде. Микроволновое излучение представляет большие возможности для применения в различных областях научных исследований и промышленности, в том числе и горном производстве.

Цель настоящей работы: на более широком материале выявить связь между химическим (минеральным) составом хромитовой руды и эффективностью его взаимодействия (в частности, температуры нагревания) с микроволновым излучением для получения оперативного способа оценки качества руды.

Методика исследований и образцы. Образцы хромитовой руды отобраны из Аркашорского рудопроявления (Войкаро-Сынинский массив). Руды по содержанию хромшпинелидов средне-, густовкрапленные, сплошные. Тип руд по составу хромшпинелидов высокохромистый магнезиальный. В таблице 1 для части исследованных образцов приведены содержания оксида хрома по результатам химического анализа, а для трех образцов – результаты дериватографии и плотность. Исследованные образцы различны по минеральному составу, количеству и содержанию примесей, содержанию влаги, пористости. Образец 1 – массивная высокохромистая магнезиальная руда слабо метаморфизована, с содержанием серпентина 3,5%, плотность 4,15 г/см^3; образец 8 – вкрапленная руда с содержанием серпентина (42%), гидроокислов железа, хлорита, карбонатов, опала, брусита; трещиноватая, плотность 2,85 г/см^3.

Таблица. Результаты анализов некоторых исследованных образцов

№№ пп	Максимальная температура нагрева, ºС	Cr_2O_3, %	Потери при прокаливании, %	σ, г/см^3
1	49,1	52,7	1,64	4,15
2	54,8	47,0		
3	60,1	42,1		
4	73,2	38,3		
5	78,5	34,7	3,65	3,12
6	100,3	31,9		
7	120,0	30,1		
8	138,3	29,5	6,03	2,85
9	145,1	25,2	6,13	2,82

Образцы хромитовой руды вырезали в форме кубика с ребром 0,15 м, нагревали в бытовой микроволновой печи, мощность на прогрев 450 Вт, время прогрева 5 минут. Время нагрева выбирали, опираясь на экспериментальные данные работы [3]. После нагревания снимали в течение некоторого времени температурную кривую, пока температура образца не достигала 25 ºС. Температура образцов до прогрева 20 ºС. Кривые спада температуры образцов приведены на рис. 1.

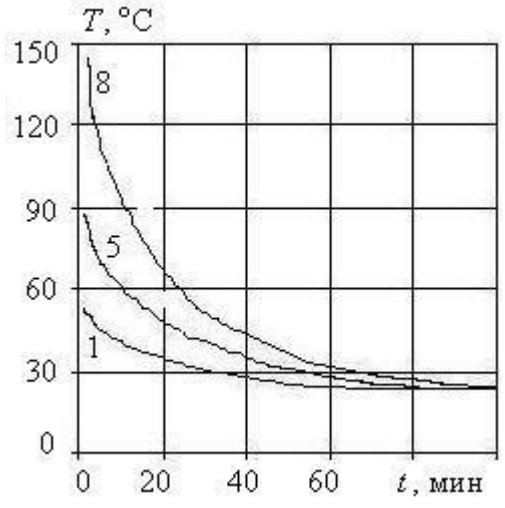


Рис. 1. Кривые спада температуры образцов 1, 5, 8, описанных в таблице.

Температурные исследования выполнил Хейнсон А.П. (Институт геофизики УрО РАН). Теплофизические параметры дубликатов образцов 1 и АК-11 определил Попов Ю.А. (Российский горно-геологический университет).

Результаты исследований. Температуры нагрева образцов сопоставлены с содержанием оксида хрома в них. Рассматривая полученные результаты, выделим два момента.

Во-первых, при одинаковых условиях эксперимента образцы нагреваются до разных температур. Наименьшую температуру нагрева приобретает образец 1 (49,1 ºС) с наибольшим содержанием хромшпинелидов (оксида хрома 52,7 %), наибольшую – образец 9 (145,1 ºС) с наименьшим (оксида хрома 25,2 %). Температуры нагрева остальных образцов находятся в этом диапазоне.

Во-вторых, спад приобретенной

температуры идет по одному закону. Примеры спада температуры для некоторых образцов: T(1)=55,9–7,4lgt, R^2=0,96; T(5)=94,3–15,6lgt, R^2=0,98; T(8)=161,3–31,4lgt, R^2=0,99. Здесь: T – температура образца в градусах Цельсия; t – время, мин.

Время остывания до температуры 20 ºС составило (минут) для образцов: 1 – 48; 5 – 73; 8 – 105.

На рис. 2 приведена связь между содержанием оксида хрома и максимальной температурой нагрева исследованных образцов.

Заключение. Изложены результаты исследования образцов хромитовой руды при облучении микроволнами. Выявлена связь между качеством руды и температурой нагрева образцов. Приведенные результаты, несмотря на ограниченное число исследованных образцов, позволяют говорить о принципиальной возможности использовать полученную информацию для оперативной оценки качества хромитовой руды по содержанию в ней хромшпинелидов (оксида хрома).

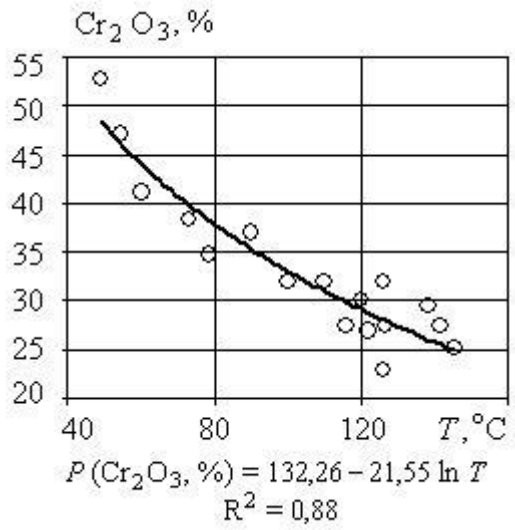


Рис. 2. Связь между содержанием оксида хрома и температурой нагрева образца. Кружки – экспериментальные значения. Линия – корреляция $P = f(T)$.

Приведенные результаты справедливы для руд высокохромистого магнезиального типа. Для других типов руд вследствие их различного генезиса и состава рудообразующих хромшпинелидов, могут быть получены другие зависимости.

Литература

1. Пробоподготовка в микроволновых печах. Теория и практика / Сборник статей. Редакторы: Г.М. Кингстон, Л.Б. Джесси / Перевод с английского И.В. Кубраковой. Под редакцией Н.М. Кузьмина. М.: Мир. 1991. 336 с.

2. Бахтерев В.В. О микроволновом облучении хромитовых руд // Уральский геофизический вестник. 2013. № 2(22). С. 13-17.

3. Ванецев А.С., Макшина Е.В., Олейников Н.Н., Третьяков Ю.Д., Романовский Б.В. Микроволновый синтез кобальтитов лантана-стронция и исследование их каталитической активности // ДАН. 2005. Т. 405. № 2. С. 204-207.

УДК 539.2

РЕКОНСТРУКЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В.Т. Беликов, Д.Г. Рывкин*, belik2a@mail.ru*
Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. С использованием разработанного алгоритма, по данным наблюдений акустической эмиссии восстановлены функция распределения по характерным размерам составляющих трещиновато-пористого пространства, а также соответствующее распределение удельной внутренней поверхности.

RECONSTRUCTION OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF ROCK ACCORDING THE OBSERVATION OF ACOUSTIC EMISSION

V.T. Belikow, D.G. Ryvkin*, belik2a@mail.ru*
Institute of Geophysics UB RAS, Ykaterinburg, Russia

Abstract. By using the developed algorithm, according to the observations data of acoustic emission distribution function by the characteristic size of fractured porous space and the corresponding distribution of specific internal surface is restored.

Результаты наблюдений акустической эмиссии (АЭ) при фильтрации сухого газа и газожидкостной смеси в образцах горных пород [1] были использованы при разработке алгоритма восстановления их структурных характеристик. Для описания АЭ при фильтрации сухого газа, горную породу следует рассматривать как двухфазную среду, состоящую из твердой – “1” и газообразной – “2” фаз. Тогда частота АЭ ν_{12}, соответствующая пульсациям межфазной поверхности S_{12}, может быть определена так [2]

$$\nu_{12} = \nu = \sqrt{\Delta\sigma_{12}\Omega_{12}/\rho L^{12}} = \sqrt{\Delta\sigma\Omega/\rho L}\ , \qquad (1)$$

где $\Delta\sigma_{12} = \Delta\sigma$ - осредненная разность упругих напряжений на поверхности S_{12}, $L = L^{12}$ - осредненная амплитуда ее колебаний, $\Omega = \Omega_{12} = S_{12}/V$ - удельная внутренняя поверхность (УВП), ρ - плотность, V - объем осреднения. Для учета вклада в амплитудно-частотный (АЧ) спектр АЭ отдельных составляющих трещиновато-пористого пространства (ТПП), можно ввести функцию распределения (ФР) по их характерным размерам. Считая, что ТПП представляет собой совокупность сферических полостей, определим нормированную ФР по размерам $f(r)$ как относительное их количество в единице объема, приходящееся на единичный интервал радиусов [2]. Введем также ненормированную ФР $\tilde{f}(r)$, связанную с $f(r)$ соотношением $\tilde{f}(r) = Nf(r)$, где N - общее количество излучающих сферических полостей в единице объема с радиусами от $R_{\min}$ до $R_{\max}$. Тогда пористость φ и УВП Ω могут быть определены так [2]

$$\varphi = \frac{4\pi}{3}\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^3 \tilde{f}(r)dr; \qquad \Omega = 4\pi\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^2 \tilde{f}(r)dr\ . \qquad (2)$$

Если предположить, что полости совершают малые сферически-симметричные колебания, то распределение $\Delta\sigma(r)$ может быть задано следующим образом

$$\Delta\sigma(r) = K/r\ , \qquad (3)$$

где K коэффициент, рассчитываемый в процессе интерпретации [2]. Для описания процессов АЭ при фильтрации газожидкостной смеси необходимо рассмотреть три фазы: твердую – “1”, жидкую – “2” и газообразную – “3”, разделенных межфазными поверхностями S_{12}, S_{13} и S_{23}. Тогда частота АЭ ν_{ef} будет иметь вид [2]

$$\nu_{ef} = \sqrt{\Delta\sigma_{ef}\Omega_{ef} / \rho L^{ef}}\,, \tag{4}$$

где $\Omega_{ef} = S_{ef} / V = \Omega_{13} + \Omega_{23}$, $S_{ef} = S_{13} + S_{23}$ – общая (эффективная) излучающая межфазная поверхность, $\Delta\sigma_{ef}$ – средневзвешенный по S_{13} и S_{23} модуль осредненного вектора силы, действующей на единицу площади поверхности S_{ef}, L^{ef} – осредненная (по S_{ef}) амплитуда ее колебаний. С учетом (2), можно записать [2]

$$\Omega_{23} = 4\pi \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^2 \tilde{f}_2(r)dr = \Omega_{ef} - \Omega_{13} = \Omega_{ef} - \Omega\,; \qquad \varphi_2 = \frac{4\pi}{3} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^3 \tilde{f}_2(r)dr\,, \tag{5}$$

где $\tilde{f}_2(r)$ – ненормированная ФР жидкой фазы; φ_2 – доля объема ею занимаемая. Зависимость $\Delta\sigma_{ef}(r)$ была выбрана так

$$\Delta\sigma_{ef}(r) = K_{ef} / r\,. \tag{6}$$

где K_{ef} – коэффициент, подлежащий определению. Процедура количественной интерпретации результатов наблюдений АЭ при фильтрации сухого газа основана на соотношениях (1-3) и подробно рассмотрена в [2]. В первом приближении коэффициент K считался постоянным во всем промежутке от $R_{\min}$ до $R_{\max}$. Во втором приближении предполагалось, что в каждом из интервалов разбиения шкалы радиусов K может принимать различные значения. Для их определения была использована процедура, сводящаяся к поиску минимума Ω при постоянной пористости φ [2]. Распределение амплитуд L в зависимости от r приведено на рис. 1.

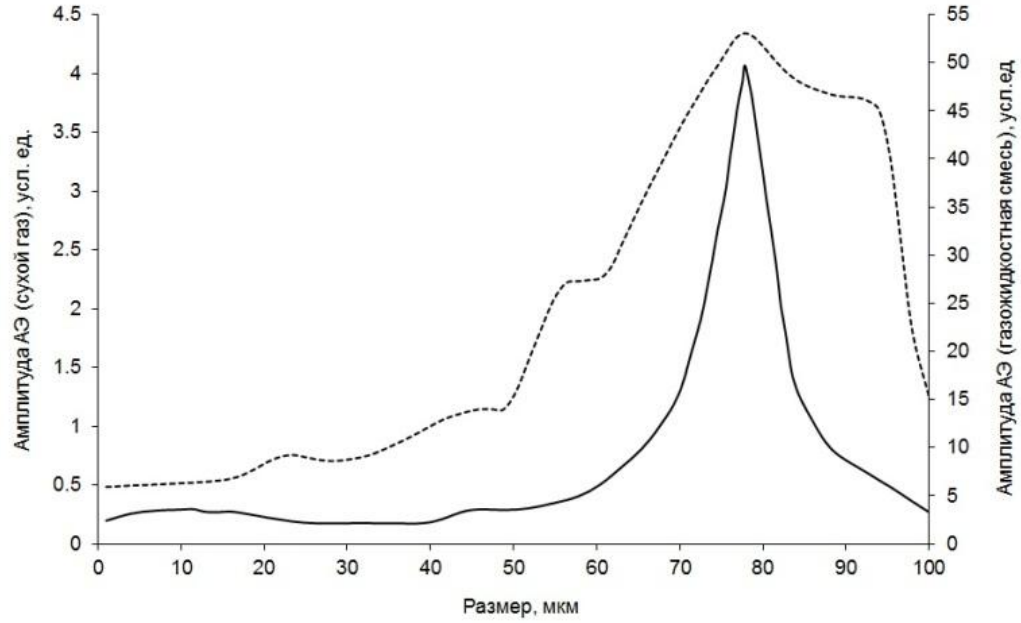


Рис. 1. Распределения амплитуд АЭ при фильтрации сухого газа (сплошная линия) и газожидкостной смеси (пунктир).

Восстановленные ФР $f(r)$, соответствующие первому и второму (исправленная) приближениям представлены на рис. 2. Анализ графиков на рис. 1 и 2 показывает, что область максимальных значений амплитуд хорошо коррелирует с областью максимальных значений исправленной ФР $f(r)$. При этом характер ее изменения в области малых радиусов лучше соответствует распределению амплитуд АЭ в зависимости от r. На рис. 3 приведено распределение относительных (по отношению Ω) значений УВП $\Omega(r)$. Сравнение графиков на рис. 1 и 3 также указывает на взаимосвязь области максимальных значений в распределении $\Omega(r)$ с областью максимальных значений L. Это означает, что участки

межфазной поверхности именно из этого интервала характерных размеров (60-90 мкм) дают основной вклад в регистрируемое излучение.

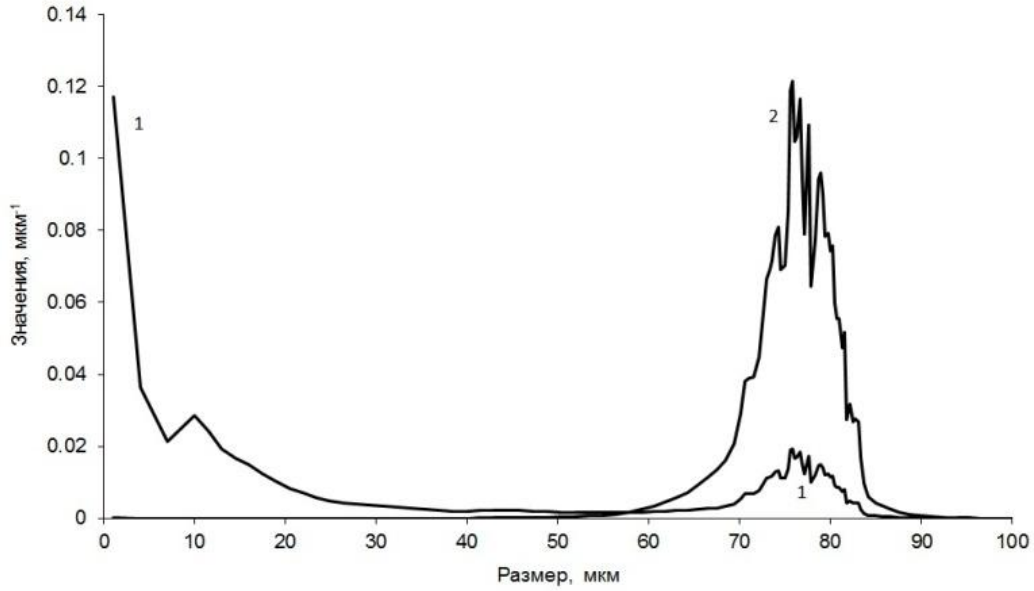


Рис. 2. Нормированная функция распределения $f(r)$***. 1- первое приближение; 2- второе приближение.***

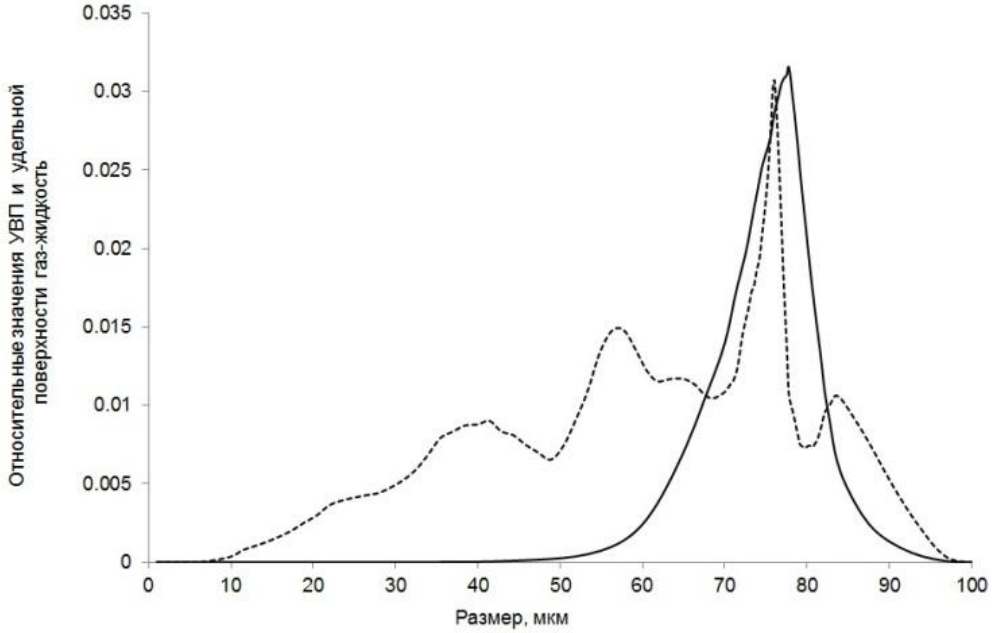


Рис. 3. Распределения относительных значений УВП $\Omega(r)$ ***(сплошная линия) и*** $\Omega_{23}(r)$ ***(пунктир), соответствующие второму приближению.***

Если вспомнить, что АЭ обусловлена колебаниями поверхностей трещин и пор, выведенных из равновесия фильтрующимся флюидом, то можно заключить, что движение газа осуществляется, в основном, по составляющим ТПП, характерные размеры которых лежат в указанном интервале 60-90 мкм. Процедура количественной интерпретации данных по АЧ спектру АЭ при фильтрации газожидкостной смеси основана на соотношениях (4-6) и детально рассмотрена в [2]. В первом приближении коэффициент K_{ef} предполагался одинаковым во всем промежутке изменения характерных размеров. Для поиска поинтервальных значений K_{ef} во втором приближении использовалась процедура, сводящаяся к поиску минимума Ω_{23} при постоянном значении доли объема, занимаемой

жидкой фазой φ_2 [2]. Распределение амплитуд L^{ef}, в зависимости от радиуса, приведено на рис. 1. На рис. 4 представлены нормированные ФР $f_2(r)$, полученные в первом и втором (исправленная) приближениях.

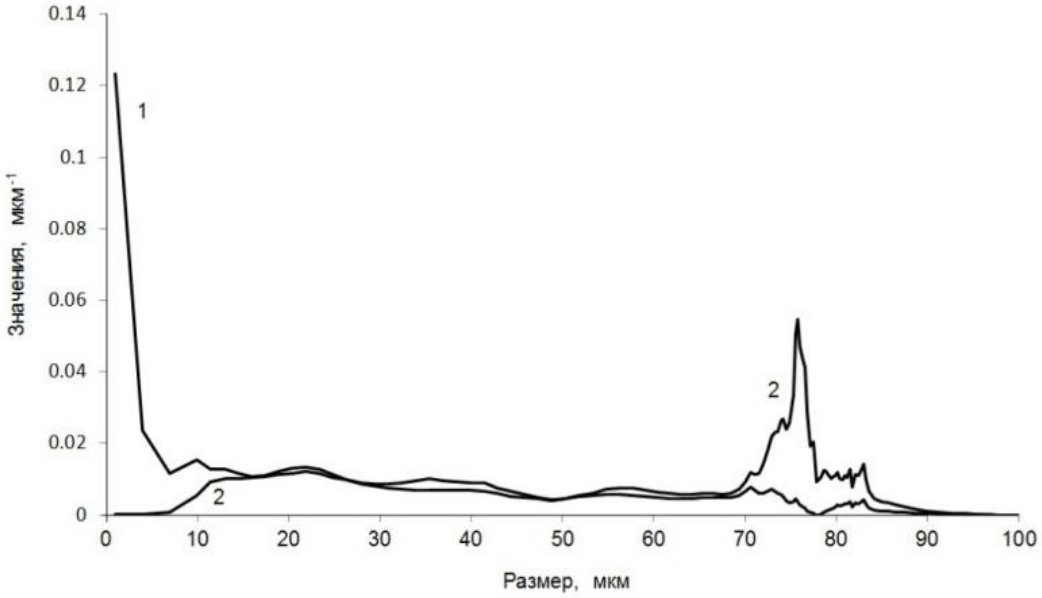


Рис. 4. Нормированная функция распределения $f_2(r)$. 1 – первое приближение; 2 – второе приближение.

Сравнение графиков на рис. 2 и 4 показывает, что максимальные значения исправленной ФР $f_2(r)$ находятся приблизительно в той же области, что и максимальные значения ФР $f(r)$ второго приближения. Это значит, что фильтрация газоводяной смеси и сухого газа, в основном, происходит по составляющим ТПП, характерные размеры, которых лежат приблизительно в одном и том же интервале. На рис. 3 приведено распределение относительных (по отношению к Ω_{23}) значений $\Omega_{23}(r)$. Анализируя его морфологию можно сделать вывод о том, что уширение в области максимальных значений амплитуд АЧ спектра АЭ (см. рис. 1) при фильтрации двухфазного флюида, по сравнению со спектром для сухого газа обусловлено появлением дополнительных излучателей, в данном случае пузырьков жидкости. Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проекты № 15-18-5-19, № 15-2-5-32.

Литература

1. Ипатов А.И., Городнов А.В., Ипатов С.И., Марьенко Н.Н., Петров Л.П., Скопинцев С.П. Исследование амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах // Геофизика. 2004. №2. С. 25-30.

2. Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Использование данных наблюдений акустической эмиссии для изучения структуры горных пород // Уральский геофизический вестник. 2014. №1. С. 11-21.

УДК 550.83:551.214(265.53)

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНОГО ВУЛКАНА ОБРУЧЕВА (КУРИЛЬСКАЯ ОСТРОВНАЯ ДУГА)

***Ю.И. Блох**, yuri_blokh@mail.ru, Москва, Россия; **В.И. Бондаренко**, vibond@list.ru, Костромской Государственный университет им. А.Н. Некрасова, Россия; **А.С. Долгаль**, asdolgal@inbox.ru, Горный институт УрО РАН, Россия; **П.Н. Новикова**, polinagfz@gmail.com, Горный институт УрО РАН, Россия; **В.А. Рашидов**, rashidva@kscnet.ru, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Россия; **А.А. Трусов**, trusov@aerogeo.ru, ЗАО «ГНПП Аэрогеофизика», Россия*

Применение современных интерпретационных технологий для обработки результатов комплексных геолого-геофизических исследований подводного вулкана Обручева в Курильской островной дуге показало, что наиболее намагниченной является привершинная часть вулканической постройки и позволило предположить наличие на глубинах 3700-4200 м застывшего магматического очага. Вероятнее всего, вулканическая постройка образовалась в неогеновое время.

COMPLEX GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL INVESTIGATION OF OBRUCHEV SUBMARINE VOLCANO, KURILE ISLAND ARC

***Yu.I. Blokh**, yuri_blokh@mail.ru, Moscow, Russia; **V.I. Bondarenko**, vibond@list.ru, Nekrasov State University in Kostroma, Russia;, **A.S. Dolgal**, asdolgal@inbox.ru, Mining Institute of the Ural Branch of the RAS, Perm, Russia; **P.N. Novikova**, polinagfz@gmail.com, Mining Institute of the Ural Branch of the RAS, Perm, Russia; **V.A. Rashidov**, rashidva@kscnet.ru, Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; **A.A. Trusov**, trusov@aerogeo.ru, CJSC «GNPP Aerogeofizika», Moscow, Russia*

The application of current interpretative technologies for processing of the results of complex geological and geophysical studies of the Obruchev submarine volcano in the Kuril island arc showed that the apical part of volcanic structure is the most magnetized and suggesting the presence of at depths of 3700-4200 m solidified magma pocket. Most probably, the volcanic structure was formed in Neogene time.

Подводный вулкан Обручева, названный в честь крупнейшего отечественного геолога академика В.А. Обручева [3], расположен в 50 км к север-северо-западу от о. Броутона. Он возвышается над дном Охотского моря на 2200 м, имеет размеры основании 11×15 км и довольно правильную конусовидную форму (рис. 1, 2а) и в каталог «Подводных вулканов и гор Курильской островной дуги» вошел под номером 6.2 [8].

Крутизна склонов подводного вулкана Обручева возрастает от основания к привершинной части от 6 до 25°, а вблизи вершины превышает 30°.

Подножие вулкана, судя по данным непрерывного сейсмоакустического профилирования, перекрыто осадками мощностью до 500-600 м. Размер погребенного под осадками основания вулканической постройки – 20×24 км, а ее полная высота – 2700-2800 м. Объем постройки ~ 400 км^3 [8].

По мнению японских ученых, ранее выполнивших гидромагнитную съемку подводного вулкана Обручева, вулкан имеет меловой возраст, а его эффективная намагниченность составляет ~ 1 А/м [9].

В 21 рейсе НИС «Пегас» сахалинские коллеги провели два драгирования подводного вулкана Обручева и подняли обломки андезибазальтов и андезитов свежего не измененного облика, значительное количество обломков измененных фельзитов и дацитовых порфиров, редкие обломки габбро, гранодиорита, гранита [6]. В одной из драг они обнаружили единичные гидротермально-измененных эффузивов и туфобрекчий с редкой вкрапленностью самородной серы, которые связали с фумарольной деятельностью подводного вулкана.

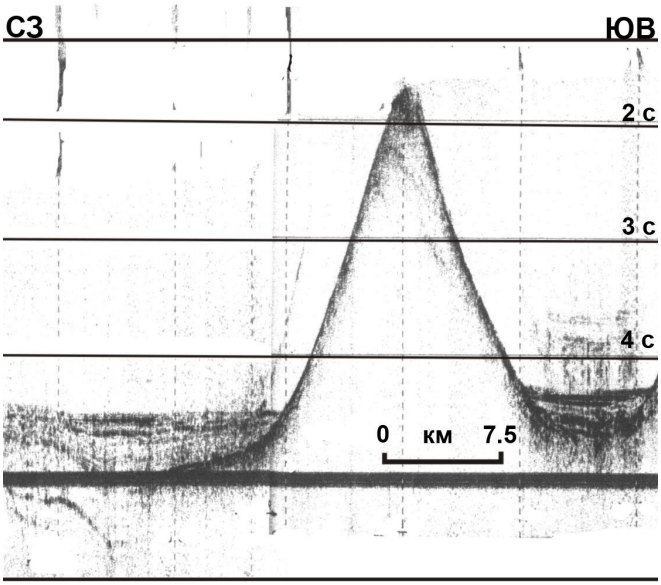


Рис. 1. Фрагмент профиля непрерывного сейсмоакустического профилирования через подводный вулкан Обручева.

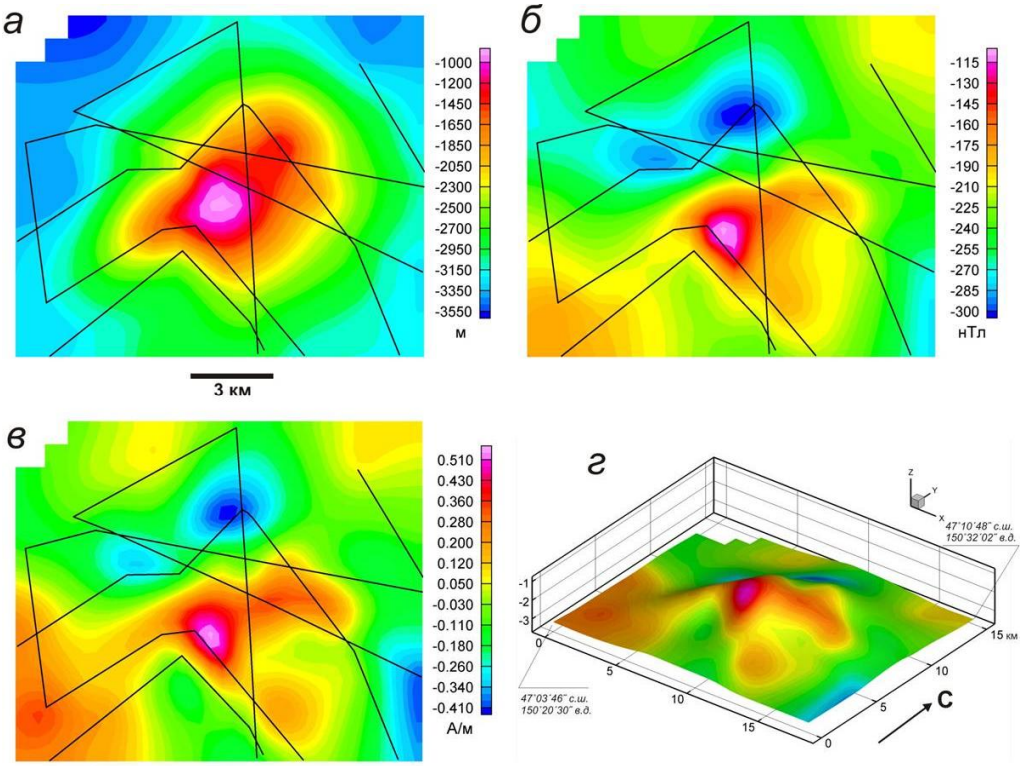


Рис. 2. Подводный вулкан Обручева: *а* – батиметрия; *б* – аномальное магнитное поле ΔTa; *в* – распределение эффективной намагниченности горных пород; *г* – распределение эффективной намагниченности горных пород, изображенное на поверхности вулкана.

В 17-м рейсе НИС «Вулканолог», в привершинной части подводного вулкана Обручева в интервале глубин 960-1350 м выполнено три станции драгирования и поднят разнообразный по составу материал. Привершинную часть постройки, вероятно, слагают преобладающие в драгах пропилитизированные андезиты и дациандезиты. Появление на вершине вулкана разнообразных интрузивных и вулканогенно-осадочных пород, так же как и редких обломков относительно свежих базальтов, является, по нашему мнению, результатом ледового разноса. Мы считаем, что и драгированные в 21 рейсе НИС «Пегас»

интрузивные и гидротермально-измененные породы также являются результатом ледового разноса.

Петромагнитные исследования горных пород, драгированных в 17 рейсе НИС «Вулканолог», показали, что диапазон изменения J_n драгированных горных пород– (0.02-0.42) А/м, магнитной восприимчивости æ – (0.04-30.77)×10^{-3} ед. СИ, а фактора Кенигсбергера – 0.15-19.

Подводный вулкан Обручева расположен в области слабоотрицательного аномального магнитного поля (рис. 2б). Минимальное значение магнитного поля (около -220 нТл) приурочено к север-северо-восточному склону, максимальное (до 30 нТл) – к привершинной части постройки с небольшим смещением к югу, то есть в целом эта часть постройки имеет намагниченность близкую по направлению к современному магнитному полю $\mathbf{T_0}$ Земли. Размах аномалии, приуроченной к привершинной части постройки – 150-180 нТл, а полная амплитуда аномалии ~ 250 нТл.

Применение интегрированной системы СИНГУЛЯР [5] позволило установить субвертикальное положение подводящих каналов и наличие на глубинах 3700-4200 м застывшего магматического очага [1, 4].

3D моделирование вулканической постройки с помощью программы REIST из пакета структурной интерпретации гравитационных и магнитных аномалий СИГМА-3D [2], показало, что наиболее намагниченной является привершинная часть вулканической постройки (рис. 2в, 2г). Эффективная намагниченность здесь не превышает 0.55 А/м.

С помощью программы ИГЛА (Блох, Трусов, 2007) уточнено, что вектор намагниченности пород отклонен от вектора нормального магнитного поля $\mathbf{T_0}$ на угол около 12°, что может свидетельствовать об умеренной составляющей остаточной намагниченности (рис. 3).

Интерпретационная томография (рис. 4а, 4б) приближенно отобразила контуры крутопадающей положительной аномальной зоны, протягивающейся от вершины вулканической постройки, где наблюдаются наиболее высокие значения поля, до глубины ~ 3 км.

Решение смешанной обратной задачи магниторазведки монтажным методом (рис. 4в) позволило выделить крутопадающий аномалиеобразующий объект с вертикальной намагниченностью ~ 1 А/м, направление которой отличается приблизительно на 8° от направления нормального магнитного поля $\mathbf{T_0}$ в районе КОД.

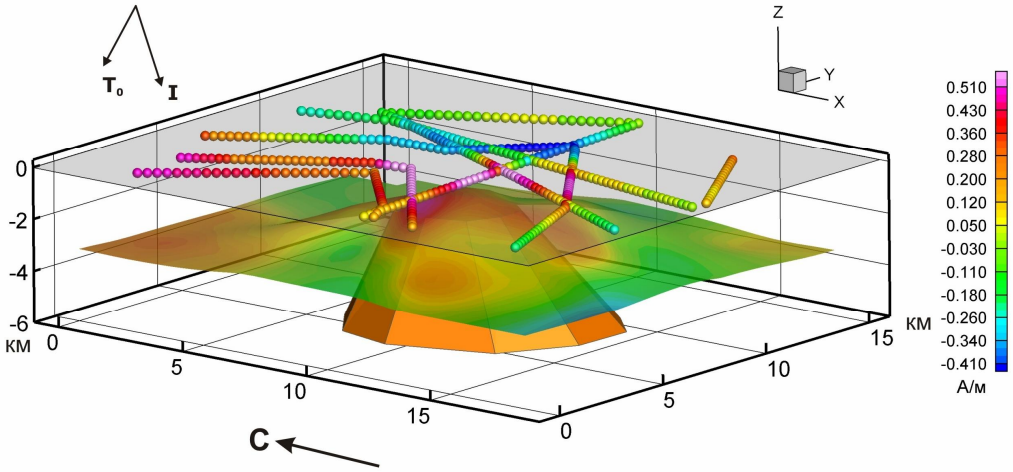


Рис. 3. Уточнение ориентировки вектора намагниченности пород, слагающих подводный вулкан Обручева, с помощью программы ИГЛА.

Учитывая результаты наших исследований и тот факт, что в пределах вулканического пояса Большой Курильской гряды отсутствуют вулканогенные образования древнее неогена [7], предположение японских ученых о меловом возрасте подводного вулкана Обручева,

нам кажется маловероятным. По-нашему мнению, вулканическая постройка подводного вулкана Обручева, скорее всего, образовалась в неогеновое время.

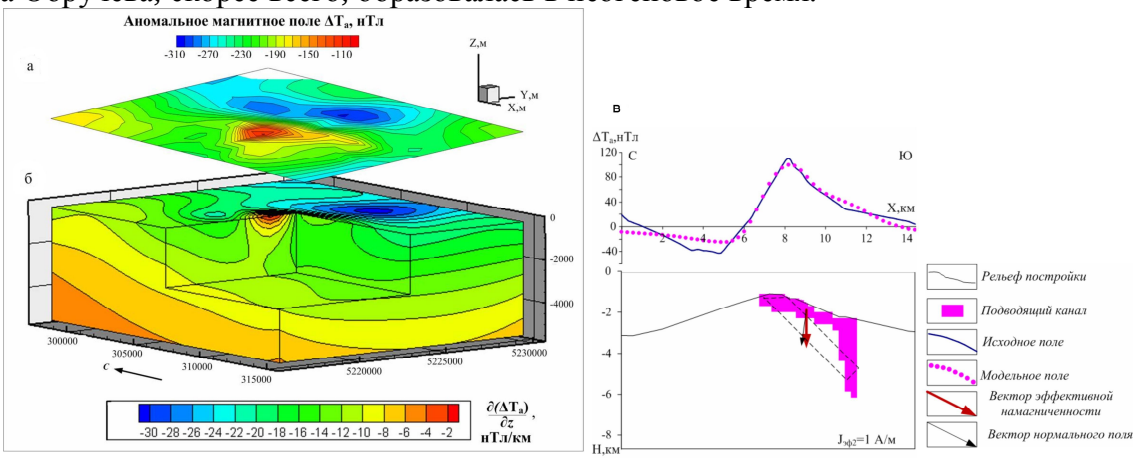


Рис. 4. Изолинии аномального магнитного поля ΔT_a подводного вулкана Обручева (а); 3D-диаграмма, отражающая пространственное распределение квазинамагниченности горных пород (б); результаты решения смешанной обратной задачи магниторазведки монтажным методом (в).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 15-05-02955-а и 15-05-01823-а).

Список литературы

1. Аникин Л.П., Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н. , Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А. Комплексные геолого-геофизические исследования подводных вулканов Охотоморского склона Курильской островной дуги в 2014-2015 гг. // Вулканизм и связанные с ним процессы. XVIII ежегодная научная конференция, посвященная Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 115-118.

2. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Изучение рельефа поверхности кристаллического фундамента по данным магниторазведки // Геофизика. 2003. № 4. С. 37-40.

3. Безруков П.Л., Зенкевич Н.Л., Канаев В.Ф., Удинцев Г.Б. Подводные горы и вулканы Курильской островной гряды // Труды Лаборатории вулканологии. 1958. Вып. 13. С. 71-88.

4. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Рашидов В.А., Трусов А.А. Геофизические исследования подводного вулкана Обручева (Курильская островная дуга) // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 42-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского (г. Пермь, 26–30 января 2015 г.). Горный ин-т УрО РАН, Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. С. 21-23.

5. Блох Ю.И., Каплун Д.В., Коняев О.Н. Возможности интерпретации потенциальных полей методами особых точек в интегрированной системе «СИНГУЛЯР» // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1993. № 6. С. 123-127.

6. Корнев О.С. Неверов Ю.Л., Остапенко В.Ф. и др. Результаты геологического драгирования в Охотском море на НИС «Пегас» (21-й рейс) // Геологическое строение Охотоморского региона. Владивосток: СахКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 36-51.

7. Пискунов Б.Н. Геолого-петрологическая специфика вулканизма островных дуг. М.: Наука, 1987. 238 с.

8. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. Пущаровский Ю.М. М.: Наука, 1992. 528 с.

9. Yasui M., Hashimoto Y., Ueda S. Geomagnetic and Bathymetric Study of the Okhotsk Sea - (1) // Oceanographical Magazine. 1967. V. 19. № 1. P. 73-85.

УДК 550.837

О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОЛЁНОСТИ ВОД ПРИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Н.В. Бобровников, Ю.Б. Петухова
Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. В статье представлены результаты лабораторных работ, которые были выполнены для оценки достижимой точности в определении содержания растворённых в природных водах веществ, по результатам полевых измерений с электроразведочной аппаратурой.

Солёность вод, удельное электрическое сопротивление, удельная электропроводность, концентрация раствора.

ON THE ACCURACY OF DETERMINATION OF THE SALINITY IN GEOENVIRONMENTAL STUDIES

Bobrovnikov N.V., Petuchova U.B. *– Institute of Geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg*

Abstract. The article presents the results of laboratory work that was performed to assess the achievable accuracy in the determination of the content of solutes in natural waters, the results of field measurements with geoelectrical equipment.

The salinity, resistivity, specific conductance, concentration of the solution.

Введение

Определение солёности воды на основе измерения её удельного электрического сопротивления широко применяемая технология в аналитической химии, при океанологических исследованиях. Разработаны рекомендации проведения аналогичных работ и при выполнении геофизических измерений в ходе гидромелиоративного строительства [1], но эти рекомендации основаны на феноменологических исследованиях и не дают оснований для прогнозирования точности, достижимой при использовании геофизических измерительных установок. Выполненная работа позволила подойти к оценке достижимой точности на основе лабораторных опытов, приближенным к кондуктометрическим исследованиям.

Методика и аппаратура лабораторных работ

Целью наших исследований стало стремление, на основе лабораторных работ, определить может ли частота переменного тока влиять на точность определения концентрации раствора, зависит ли точность определений от состава растворённых веществ.

Первоначально предметом исследований стали частотные характеристики удельного сопротивления ($\rho = 1/\sigma$) дистиллированной воды и растворов солей в диапазоне низких частот. Выполнили измерения на переменном токе, опираясь на квазистационарное приближение, как это принято при работе с современной низкочастотной электроразведочной аппаратурой. Квазистационарное приближение не учитывает частотную дисперсию и возможность проявления волновых процессов в среде. Для обоснованного выбора частот, на которых такая модель применима, изучили диапазон частот от 4 до 34000 Гц.

Измерения проводили двумя четырёхэлектродными установками, размещёнными на поверхности изучаемой среды, имитирующей электропроводное полупространство. У одной установки электроды располагались по квадрату 2 х 2 см перпендикулярно плоскости, как ножки у столика. Два электрода с одной стороны использовали как генераторные, два противоположных - как измерительные. Другая установка Венера – все четыре электрода располагались в одну линию, с постоянным шагом 5 мм. Пара внешних электродов служила генераторными, а пара внутренних использовалась для измерения разности потенциалов (см.рис.1). Измеряли разность потенциалов на приёмных электродах и падение напряжения на шунте, включенном последовательно в цепь генераторных. Удельное сопротивление рассчитывали по обычной формуле (1)

$$\rho = Rш*K*Umn/Uш \qquad (1)$$

где К – геометрический коэффициент установки (м), Rш – сопротивление шунта в питающей линии (Ом), Umn и Uш - измеренные падения напряжения на приёмных электродах и на шунте (мВ), соответственно.

Нужно обратить внимание на очень существенное отличие применённых в экспериментах измерительных установок от используемых в кондуктометрии, где пытаются достичь одинаковой плотности электрического тока по сечению столба изучаемой жидкости. Наши лабораторные установки создают неравномерную плотность тока в объёме изучаемой среды.

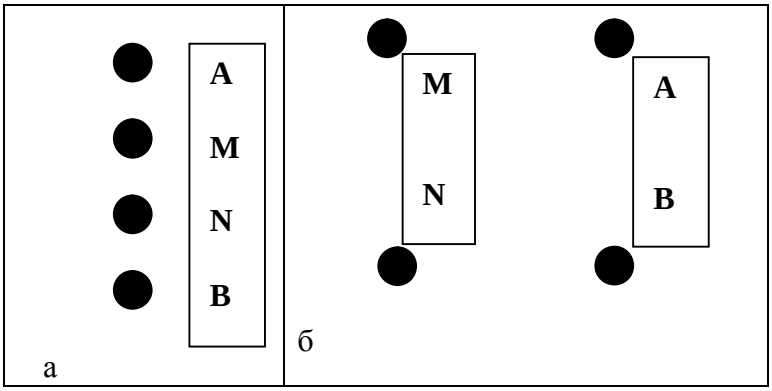


Рис. 2. Схемы измерительных установок: а – Веннера, б – «столик».

Зависимость электропроводности от концентрации растворённых веществ для ионного проводника в системе СИ

$$\sigma = \Sigma e Z_i * n_i * u_i . \qquad (2)$$

где i- знак принадлежности к определённому типу, n_i – содержание ионов, кГ/м^3, e Z_i, - заряд иона, e – элементарный заряд, 1,6 10^{-9} Кл, Z –валентность, u_i – подвижность ионов, м^2/В*сек.

Наиболее детально подвижности ионов изучены на основе электрохимических реакций, но в электрохимии применяется другая система единиц, основанная на понятиях «моль» - число N = 6,02 *10^{23} частиц, «грамм-эквивалент» - количество вещества в граммах, содержащее один моль. Для обеспечения возможности использовать в геофизических расчётах данные из электрохимических справочников необходимо модифицировать уравнение (2). Используем величину, называемую ионной электропроводностью [3]

$$\lambda_i = |Z_i| F u_i \qquad (3)$$

где F – число Фарадея, F = eN.

После модификации приходим к выражению

$$\sigma = 10^{-3} \Sigma \lambda_i C_i. \qquad (4)$$

где σ - проводимость, Омм$^{-1}$, λ_i – м^2/(Ом*г-экв), С – концентрация, г-экв/л.

Полученное соотношение даёт возможность вычислять суммарную концентрацию растворённых веществ по измеренной величине удельного сопротивления раствора.

$$\Sigma C_i = 1000/(\rho \Sigma \lambda_i). \qquad (5)$$

Окончательное выражение не учитывает зависимость электропроводности от температуры электролита - понижении удельного сопротивления электролита более чем 2% при повышении температуры на 1 градус. Зависимости электрической проводимости от концентрации растворов нескольких электролитов подробно рассматриваются в книге Дамаскина и др.[3].

Наша работа нацелена на изучение природных грунтовых вод, концентрация растворённых веществ в которых обычно менее 0,1 г-экв/л, что позволяет использовать в расчётах табличные значения ионной проводимости при максимальном разбавлении (см. таблицу 1).

В кондуктометрических исследованиях для тестирования и калибровки измерительных установок применяют растворы KCl. Мы воспользовались этим опытом, и первые измерения

проводили с растворами сильвинита разных концентраций. На рисунке 3 приведены графики частотной зависимости удельного сопротивления раствора концентрации 1,5 10^{-3} М, полученные разными установками. Кривые расходятся на высоких и низких частотах, но демонстрируют близкие значения в интервале 200 – 2000 Гц.

Таблица 1

Предельная молярная электрическая проводимость ионов в воде при 25 ^{o}C [4].

Катион	λ_0 *10^4, м2/(Омм*моль)		Анион	λ_0 *10^4, м2/(Омм*моль)
H^+	349,8		OH^-	198.3
$1/2Ca^{++}$	59,5		Cl^-	76.35
K^+	73,5		$1/2CO_3^{--}$	69.3
Na^+	50.1		HCO_3^-	44.5
$1/2Mg^{++}$	53.0		$1/2SO_3^{--}$	72
$1/2Sr^{++}$	59.4		$1/2SO_4^{--}$	80.0

Учитывая требования кондуктометрии использовать для измерений токи высоких частот, мы во всех расчётах использовали значения полученные установками Веннера на частоте 1087,5 Гц, одной из заложенных в конструкции генераторного устройства. В первой серии экспериментов изучали вариации удельного сопротивления растворов сильвинита - KCl и поваренной соли - NaCl двух концентраций: 1,5 10^{-3} М и 5 10^{-3} М. По ряду измеренных значений находили среднее, вычисляли отклонения от среднего, по средним вычисляли концентрации растворов, согласно (5) и сравнивали полученные значения с исходными. Все результаты расчётов приведены в таблице 2

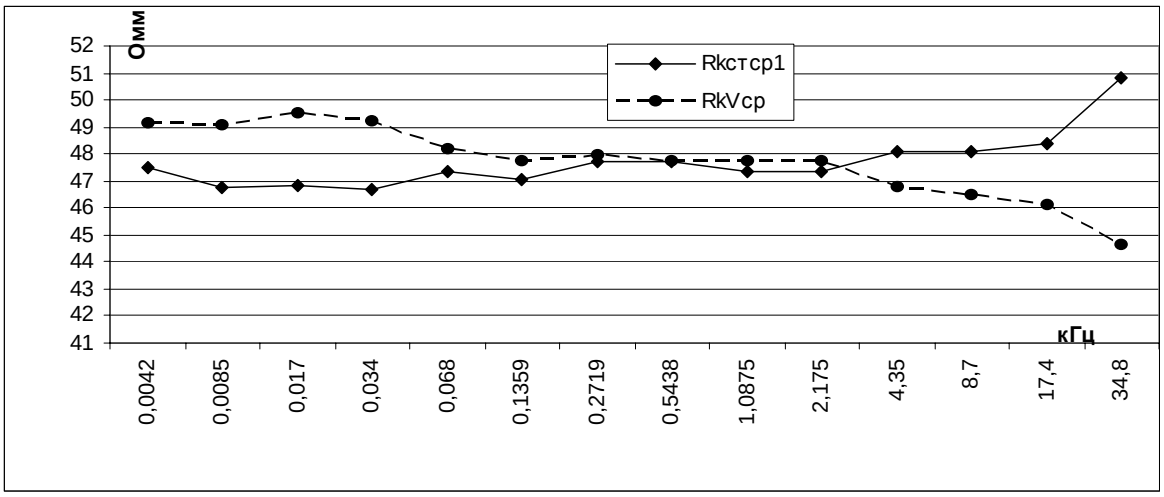


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики удельного сопротивления 1,5 10^{-3} М раствора KCl , полученные установками Веннера и «столик».

Опыты подтвердили, что измеренные значения в растворах сильвинита более стабильны, чем в растворах поваренной соли, кроме того, стабильность измеренных значений возрастает с повышением концентрации электролита. Неожиданным оказался тот факт, что средние значения удельного сопротивления электролита NaCl позволяли вычислить концентрацию раствора с большей точностью, чем для KCl.

Таблица 2

№пп	Электролит	Концентр. заданная Г-экв.	К-во. опред	Рк ср Омм	дРк, %	Концентр Вычисленная Г-экв.	Ошибка %
1	KCl	1,5 10^{-3}	9	47,8	8	1,41 10^{-3}	6
2	KCl	5 10^{-3}	6	4,84	2	4,84 10^{-3}	3
3	NaCl	1,5 10^{-3}	6	53,4	9	1,5 10^{-3}	0
4	NaCl	5 10^{-3}	6	15,9	4,2	5 10^{-3}	0

Эта часть экспериментов подтвердила возможность достижения точности определения содержания хлоридов в растворе не хуже 10 %, при использовании электроразведочных четырёхэлектродных измерительных установок. Аналогичные измерения наиболее эффективны для океанологии, поскольку морская вода на 85 % состоит из растворов хлоридов [5]. В отличие от этого пресные воды материков содержат преимущественно гидрокарбонаты, которые химически гораздо менее устойчивы.

В качестве примера неустойчивого соединения мы использовали раствор щёлочи КОН, концентрации 1,5 10^{-2} М. Методика измерений не изменялась. Вычисленные значения концентрации для четырёх дней октября приведены в таблице 3, строка 1. Результаты показывают, что концентрация постоянно убывает, причём даже в первый день вычисленные значения практически в три раза ниже исходных. Наиболее вероятная причина таких изменений – химическое перерождение состава раствора под влиянием внешних факторов.

Таблица 3

		Даты экспериментов			
№ пп	Электролит	7,10	8,10	9,10	14,10
1	KOH	5,5 10^{-3}	4,7 10^{-3}	3,8 10^{-3}	2,7 10^{-3}
2	$KHCO_3$	1,26 10^{-2}	1,1 10^{-2}	8,7 10^{-3}	6,23 10^{-3}

Например, возможна нейтрализация гидроксила растворённым в воде углекислым газом, с образованием гидрокарбоната по схеме:

$OH^- + CO_2 = - HCO_3$ (6)

Мы пересчитали концентрации для гидрокарбоната калия, и результаты поместили в строку 2 таблицы 3. Ошибка для первого дня составила около 20 %, в последующем она увеличивается за счёт каких - то неизвестных взаимодействий.

Заключение

Результаты выполненных работ показали, что, несмотря на неравномерную плотность тока в среде при использовании геофизических четырёхэлектродных измерительных установок для определения концентрации водных растворов, может быть достигнута точность сопоставимая с точностью при кондуктометрических измерениях. Для достижения лучших результатов желательно сначала изучить частотную характеристику раствора с используемой измерительной установкой и по ней выбрать частоту (или диапазон частот) для последующих серийных измерений. Полученные результаты показывают также, что достижимая точность зависит от состава электролита, поскольку существуют растворы подверженные непрерывным изменениям.

Литература

1. Геофизические методы в изысканиях для гидромелиоративного строительства (Пособие к ВСН-33-2.1.05-85 "Гидрогеологические и инженерно-геологические изыскания для мелиоративного и водохозяйственного строительства. Нормы и правила") Минводхоз СССР. В/О Союзводпроект. Союзгипроводхоз. - М., 1986 год
2. Худякова Т. А., Крешков А. П., Теория и практика кондуктометрического и хронокондуктометрического анализа, М., 1976
3. Дамаскин Б. Б., Петрий О. А., Цирлина Г. А. Электрохимия /М.: Химия, Колос, 2006. 672 с.
4. Краткий справочник физико-химических величин. \Л.: Химия, 1983, с.231
5. Хомченко И.Г., Трифонов А.В., Разуваев Б.Н. Современный аквариум и химия. / ООО «Издательство Новая волна», М. 1997
6. Улитин Р.В., Бобровников Н.В, Гаврилова И.Э., Харус Р.Л., Чистосердов Б.М. Геоэлектрика при инженерно-экологической диагностике урбанизированных территорий./Теория и практика интерпретации данных электромагнитных геофизических методов. Наука УрО, Екатеринбург, 1996, с.80 - 91.

УДК 550.83

ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ ДЛЯ ГЕОСТРУКТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Н.В. Бобровников, А.К. Юрков
Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. В докладе сообщается о результатах опытных измерений электромагнитных полей блуждающих токов промышленной частоты на протяжённых профилях, с целью установления корреляции между параметрами полей и геологическим строением территорий.

ABOUT EXPERIMENTS ON THE USE OF ELECTROMAGNETIC FIELDS, STRAY CURRENTS FOR STRUCTURAL STUDIES

N.V. Bobrovnikov, A.K. Yurkov
Institute of Geophysics UB RAS, Yekaterinburg

Abstract. The report describes the results of experimental measurements of electromagnetic fields, stray currents of industrial frequency on long profiles, with the aim of establishing correlations between the parameters fields and geological structure of the territory.

В недалёком прошлом в Институте геофизики УНЦ проводилось изучение закономерностей распространения в земной коре блуждающих токов промышленного происхождения, частотой 50 Гц. Был выявлен ряд особенностей, в распространении этих электромагнитных полей. На основе проведённых исследований были разработаны новые методы изучения строения геологической среды, и разработаны новые геофизические методы выявления рудоперспективных структур. Все эти методы объединены под общим названием ТЭМП (методы Техногенного ЭлектроМагнитного Поля) и основаны на измерении векторных характеристик поля, т.е. определения как модуля, так и направления компонент поля. Такая особенность позволяет использовать методы ТЭМП не только для картирования электропроводных структур, но и для определения их положения в объёме горных пород, тем самым, определяя некоторые структурные элементы электропроводной среды. Основное назначение этих разработок рассматривалось как поиски сульфидных руд, но интересные результаты удалось получить и при структурных исследованиях.

В условиях Среднего Урала часто приходится иметь дело с двухслойными средами, у которых нижний слой (основание разреза) представлен монолитными породами высокого сопротивления, а верхний, более электропроводный слой, образован корой выветривания этих пород. Отличительная особенность коры выветривания от слоя рыхлых отложений заключается в отсутствии четкой границы с подстилающими породами. Вместо этого происходит постепенное увеличение электрического сопротивления с глубиной. При изучении методами зондирований таких сред получают кривые типа “А”, которые трудно поддаются количественной интерпретации. Ситуация осложняется еще и тем, что нижняя граница коры выветривания как правило не ровная, в силу разных геологических причин претерпевает большие колебания по глубине, что еще больше осложняет интерпретацию результатов зондирований.

Возможно применение другого способа для изучения мощности коры выветривания. Так, если материнский массив не имеет рудных включений, то его сопротивление можно считать бесконечно большим. Следовательно, вся проводимость горных пород сосредоточена в коре выветривания. Возможно в таком случае применить метод профилирования, глубинность которого существенно превышает мощность коры выветривания, и по результатам профилирований качественно судить о характере изменений мощности коры. В том случае, если имеется возможность сопоставить результаты профилирований с известными в некоторых точках изучаемой территории истинными значениями мощности, то удается определить корреляционную зависимость кажущегося сопротивления от глубины распространения коры выветривания и дать количественную интерпретацию результатов измерений.

Для решения задач по такой схеме может быть использован метод ТЭМП [2], одно из главных достоинств этого метода состоит в его глубинности, что определяется низкой частотой поля — 50 Гц. При такой частоте, мощность коры выветривания, которая обычно не превышает 100 метров, оказывается много меньше скин-слоя, что позволяет получить линейную корреляционную зависимость импеданса поля [3] от глубины залегания фундамента материнских пород. Другое достоинство метода состоит в
удаленности источников первичного поля, это позволяет однозначно приписывать результаты измерений тому пикету, на котором они получены, что отличает этот метод от методов, использующих дипольные измерительные установки.

Рассмотрим пример изучения мощности коры выветривания на одном из участков на Среднем Урале. В геологическом строении участка принимают участие разные по составу породы эфузивно-интрузивного комплекса, характеризуемые высокими электрическими сопротивлениями — более 2000 Ом.м. Сопротивление пород коры выветривания в приповерхностном слое менее 200 Ом.м. Мощность коры переменная и зависит от состава материнских пород и степени их тектонической раздробленности.

На рис. 1 приведен пример определения корреляционной связи между мощностью коры выветривания (h_1), определенной по буровым скважинам и импедансом ТЭМП ($Z_{сю}$), измеренным около этих скважин. Виден линейный характер зависимости и удовлетворительная корреляция между обоими параметрами. К сожалению скважин мало, что препятствует полному статистическому анализу корреляции, но и это не исключает возможности построения карты изомощностей коры по результатам профилирования ТЭМП.

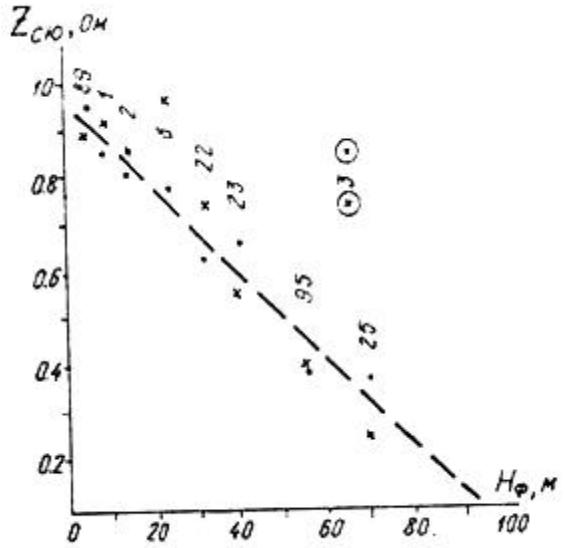


Рис. 1. Определение корреляционной зависимости Z от h_1.

• и * - границы разброса измеренных значений Zсю;
1,2, … 95 – номера скважин.

На рис.2 представлена карта геофизического прогноза изменений глубины нижнего края коры, в интервале от 10 до 90 метров. Линейные зоны увеличения мощности соответствуют местоположению разломной тектоники в фундаменте материнских пород. Карта была использована для планирования последующих буровых работ, по окончании которых средняя ошибка прогноза оценена в 20%.

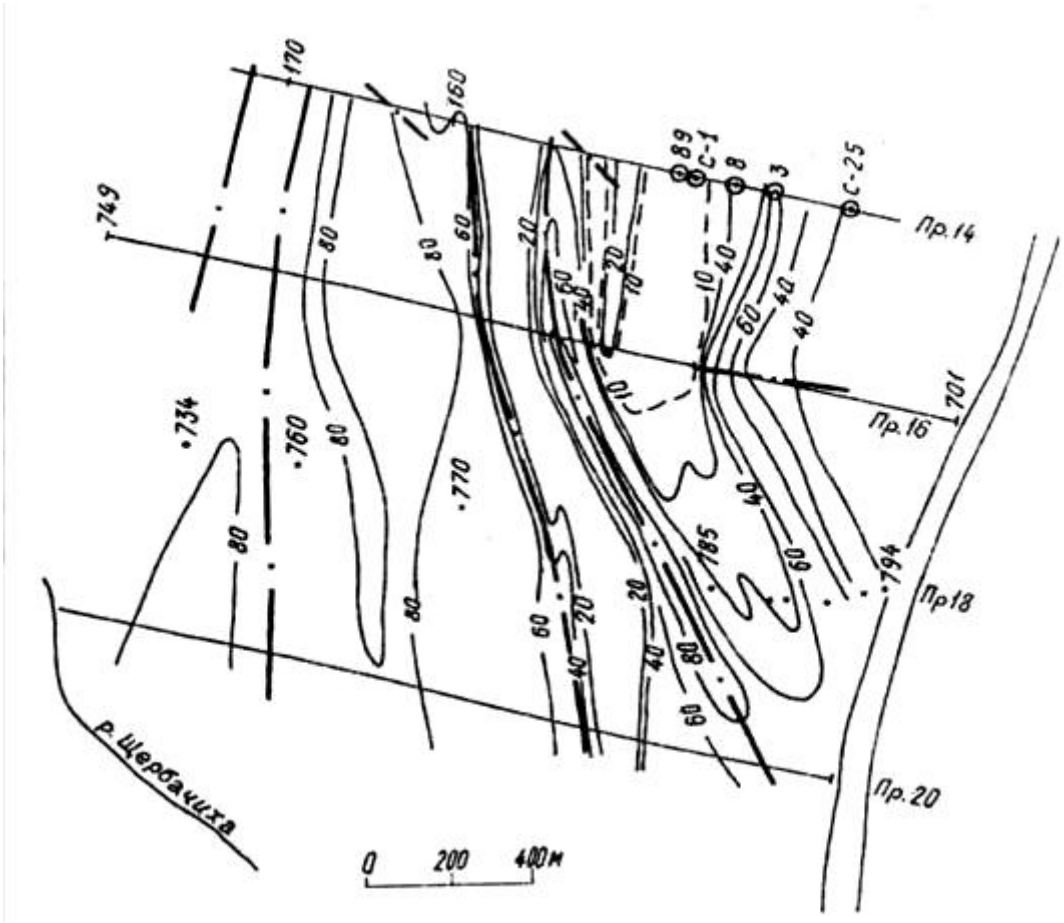


Рис. 2. Карта изомощностей коры выветривания.

Рассмотренные примеры относятся к задачам крупномасштабного картирования, но технология ТЭМП может быть применена и для региональных исследований. На рисунке 3 приведены результаты измерений полученные автором на Среднем Урале по профилю станция Незевай – село Черемисское, длина профиля 80 километров. График импеданса ТЭМП сопоставлен с геологической картой территории, достигнута удовлетворительная корреляция.

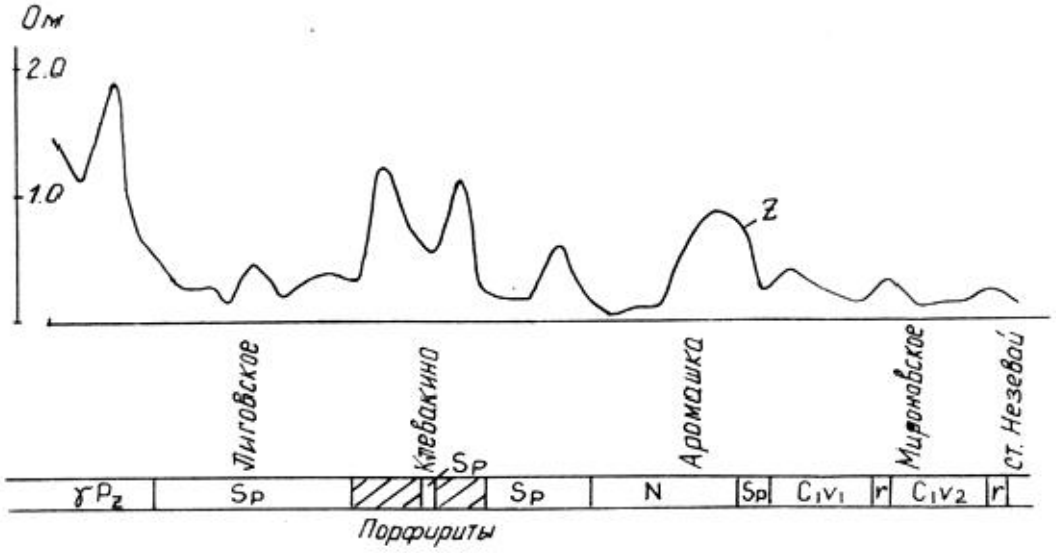


Рис. 3. Результаты импедансных измерений ТЭМП по профилю ст.Незевай – с.Черемиска.

Техногенное электромагнитное поле, как и всякое другое электромагнитное поле, способно распространяться не только вблизи источников - в виде блуждающих токов, но и на дальние расстояния в виде электромагнитной волны. В этом случае блуждающие токи являются индуцированными нестационарным полем, и также могут быть использованы для решения геологических задач, поскольку их интенсивность отражает электропроводные свойства геологической среды. Другим достоинством технологии является отсутствие потребности в специальных генераторных устройствах, что позволяет проводить региональные исследования на удалённых территориях с минимальными затратами.

Имеется опыт геоэлектрического картирования в поле ТЭМП на Приполярном Урале, на Камчатке. На рисунке 4 помещены результаты профилирований через разломную тектоническую структуру, полученные на острове Кунашир, где источником поля являются северные территории Японии. Структура выделяется низкими значениями кажущегося сопротивления. В геологическом отношении выделенная структура разделяет две вулканические постройки с действующими вулканами «Тятя» на севере и «Менделеева» на юге. На местности профиль представлен низменным плоским рельефом, с разницей высотных отметок не превышающей трёх метров.

Рис.4 Результаты опробования картирования по методу ТЭМП на о.Кунашир.

Таким образом, использование блуждающих токов промышленной частоты для решения геологических задач является весьма перспективным, а в некоторых случаях и предпочтительным по сравнению с другими методами электроразведки.

Литература

1. Бобровников Н.В., Бездверный А.Г., Гаврилова И.Э. Распределение токов промышленной частоты вблизи зоны сульфидной минерализации. // - В кн.: Теория и практика электромагнитных методов исследования вещества и структур земли. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. С.114-118.

2. Бобровников Н.В. Решение квазислоистых задач при профилировании по методу ТЭМП./ Теория и практика геоэлектрических исследований. Екатеринбург: “Наука”, УрО РАН, 1998. С. 123 - 129.

3. Бобровников Н.В. Анализ распространения техногенного электромагнитного поля в неоднородной среде./Сб.: Уральский геофизический вестник №2, Екатеринбург, УрО РАН, 2001. с 21 – 24.

УДК 550.31; 550.8.08

СЕТЬ ПОДЗЕМНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И НЕКОТОРЫЕ ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

***В.С. Бобровский*[1], *С.А. Шопин*[2]**, *Vad.Bobrovskiy@cosmetecor.org*
1 –Дистантная Школа «Космо-Метео-Тектоника», г.Петропавловск-Камчатский, Россия,
2 – ФБГОУ ВО Тульский государственный университет, г.Тула, Россия

Рассмотрены технические вопросы исследования нестационарных подземно-электрических процессов с помощью многоэлектродных систем: конструкция измерительного шурфа, набор измеряемых параметров и способы измерений. Показана структура существующей сети измерений, состоящей из 9 станций. Приведены графики нестационарных подземно-электрических сигналов, зарегистрированных перед камчатскими сильнейшими землетрясениями (2013г.). Сделан вывод о необходимости продолжения исследований и организации подземно-электрических измерений как в сейсмоопасных, так и в асейсмических районах Земли.

SUBTERRANEAN-ELECTRIC MEASUREMENTS NETWORK AND SOME OBTAINED RESULTS

***V.S. Bobrovskiy*[1], *S.A. Shopin*[2]**, *Vad.Bobrovskiy@cosmetecor.org, sshopin@mail.ru*
1 –Distant School "Cosmic-Meteo-Tectonics", Petropavlovsk-Kamchatski, Russia,
2 – Tula State University, Tula, Russia

We investigate non-stationary subterranean electric processes with the help of multi-electrode systems. Technical aspects of such measurements organization including construction of measurement pit, set of measured parameters and the method of measurement, are described. Structure of present time network, containing 9 stations, is shown. Several non-stationary subterranean electric signals recorded before Kamchatka's strongest earthquakes are presented. The report sums recent activities and propose the necessity to continue research and install subterranean electric instrumentation in seismic and aseismic regions of the Earth.

С конца XIX века исследование нестационарных электрических процессов в недрах выполняется с использованием длинных (от сотен метров до километров) измерительных линий, на концах которых расположены электроды, размещаемые в шурфах на глубине первых метров. Классической схемой измерений для распознавания глобальных вариаций земных токов является пара измерительных линий, протянутых вдоль магнитных меридиана и параллели. С помощью подобных «крестов» теллурические измерения проводятся в сейсмоопасных районах.

С 1989 г. на Камчатке под руководством к.ф.-м.н. Д.А. Кузнецова разработана и исследуется многоэлектродная система, заглубленная на границе литосфера(тектоносфера)-атмосфера. Измерения нестационарных подземно-электрических процессов (ПЭ), предшествующих сильным землетрясениям позволил распознать оперативные ПЭ-предвестники нескольких землетрясений и «аннулировать» нескольких панических сейсмопрогнозов в 1990/91 гг. в Петропавловске-Камчатском. Эпизодические измерения, проводимые в Лаборатории ПЭ-измерений кафедры физики КамГУ после Всесоюзной школы-семинара «Проблемы прогноза землетрясений», были организованы на постоянной основе с декабря 1991 по ноябрь 1994 г. в Камчатском прогностическом центре (КПЦ) при областном Штабе по делам ГО, ЧС и ЛПСБ. Некоторые результаты работы КПЦ были рассмотрены на заседании Экспертной группы по прогнозу землетрясений НИКС Центра РАН 23 апреля 1993г. (председатель член-корр. РАН Г.А. Соболев), среди рекомендаций которой было расширение сети станций измерений, формализация метода и передача для освоения в независимую организацию – Камчатский центр мониторинга сейсмической и вулканической активности (КЦМСиВА, д.геол.-мин.н. С.Т.Балеста). Несмотря на передачу специальной аппаратуры ИМПУЛЬС регистрация ПЭ-параметров на станции «Центральная» Штаба ГОиЧС была прекращена и не

добавлены новые пункты наблюдения. Формализация метода также не была осуществлена в связи с непривлечением в состав КЦМСиВА группы разработчиков метода (Д.А.Кузнецова и коллег). В результате, в декабре 1997 г. после пропуска сильного Кроноцкого ЗТ силой 5 баллов в Петропавловске-Камчатском (05.12.1997М7.8) КЦМСиВА был ликвидирован. С конца 1994 г. работы по оперативному прогнозированию сильных ЗТ вблизи Петропавловска-Камчатского выполняются на общественных началах. С 2001 г. Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника» проводит формализацию метода и расширение сети станций ПЭ-измерений.

Методология сети электрических токов является частью концепции Космо-Метео-Тектоника и позволяет интерпретировать импульсные вариации ПЭ-сигналов и их ассоциированость с комплексом нестационарных явлений, наблюдаемых в Солнечной системе, в замкнутом электрическом контуре Солнце-ядро Земли. Активные электрические процессы в приповерхностых грунтах предполагаются имеющими протонную (зарядовую) природу и описываемыми моделью протонного тектогенеза, согласно которой все тектонические процессы в земной коре обязаны потокам протонов (ядра атомов водорода), дейтронов и гидроксид-ионов в тектоногенах [2–4].

Следствием модели протонного тектогенеза является гипотеза об электрической природе ЗТ. На глобальность процессов подготовки ЗТ (глобальный сейсмоэффект Бота) впервые отчетливо указал сейсмолог М.Бот при анализе сильнейших ЗТ на Алеутских островах и Аляске [5], согласно которому в эпохи двух указанных гигантских ЗТ вне зон их афтершоков сейсмическая активность в остальных частях земного шара затихала (см. рис. 3 в [5]). Это позволило сформулировать понятие глобального сейсмического ресурса, кумуляция которого в зоне гигантского ЗТ и его афтершоков приводит к уменьшению сейсмического ресурса в остальных частях земных недр. Согласно гипотезе ЭС природы ЗТ быстрые глобальные связи между очагами ЗТ имеют электрическую природу и не могут объяснены механистическим и флюидными процессами. Подтверждение электросетевой природы ЗТ было получено в ходе продолжительных электроимпульсных экспериментов в Средней Азии и Казахстане, см. например [6-8]. В проводившихся там экспериментах искусственные ЗТ возникали после однократных импульсов подземного тока (ИПТ), подававшихся в недра от магнито-газо-динамических (МГД) генераторов через подземные электроды, закопанные в противоположные борта разломов. При этом были установлены следующие фундаментальные факты:

1. искусственные ЗТ «избегали» любого разлома, в который подавали однократный МГД-ИПТ, т.е. причиной пусков искусственных ЗТ являются не механические движения бортов разлома друг относительно друга;
2. искусственные ЗТ возникали вокруг МГД-центра, причём распределение очагов напоминало тороид, т.е. в недрах, по крайней мере, вблизи разлома, существуют электросетевые(ЭС)-структуры;
3. искусственные ЗТ возникали через 2…12 суток после подачи в разлом однократного МГД-ИПТ, т.е. после подачи однократного ИПТ происходили процессы самоорганизации, требующие определенного времени.

Указанные факты позволили сформулировать представление о сейсмическом очаге, как об узле электросети, самоорганизующейся в недрах. Учитывая модель протонного тектогенеза, в этой электросети носителями заряда могли быть только «положительные» ядра атомов водорода. Основой для анализа нестационарных процессов в открытой системе планеты, включенной в электрические контура Солнечной системы является электросетевая модель [9-13]. На рис.2 показана расширенная модель солнечно-земных связей научной программы «Solar-Terrestrial Energy Program» (STEP-1990/95), в которой замкнутый электрический контур простирается от солнечного керна до земного ядра и описывает взаимодействие солнечного ветра, земной магнетосферы-ионосферы и др. геооболочек.

Таким образом, процесс подготовки ЗТ связывается с нестационарными процессами, протекающими как в недральных, так и в глобальных электрических сетях (ЭС). Тогда для

регистрации предвестников, отображающих указанный процесс и позволяющих контролировать его развитие необходима аппаратура, обеспечивающая регистрацию локальных процессов зарядовой миграции вблизи границы «земная кора-атмосфера» (тектоносфера-атмосфера) с учетом того, что основным носителем зарядов являются протоны.

Соответствующей метод был разработан к.физ.-мат.н. Кузнецовым Д.А. и предполагает установку многоэлектродных систем, заглубленных в грунте (конденсированной среде) в неглубоких шурфах [14].

Организация измерений осуществляется следующим образом. На каждом измерительном пункте выполняется три измерительных шурфа: юго-западный (ЮЗ), центральный (Ц) и северо-восточный (СВ), разнесенных на расстояния 3–5 м друг от друга и имеющих глубину 1,5–2 м.(рис.2а). В шурфе горизонтально располагают электроды размерами около 250х250х3 мм. Друг от друга электроды отделяют слоем утрамбованного грунта мощностью ~300-500мм. В качестве материала электродов используется нержавеющая сталь, т. к. железо в сравнении с другими металлами, наиболее сильно «распухает» в атмосфере водорода [15], что возможно только при наибольшем «сродстве» протонов к атомам железа. К каждому электроду подсоединяют электрический кабель, выведенный из шурфа на поверхность земли. Соединение кабеля с электродом защищается от коррозии специальным покрытием.

Рис. 2 – Электрический контур на основе STEP-1990/95

Типовой шурф имеет 4 измерительных электрода. Однако число электродов может быть и увеличено. Наиболее информативные для распознавания нестационарных ПЭ-процессов являются шурфы, заложенные вблизи уреза морской (океанской) воды. Если измерительная станция расположена на суше, то измерительный шурф располагается как можно ближе к урезу проточной воды в наименее прочных породах.

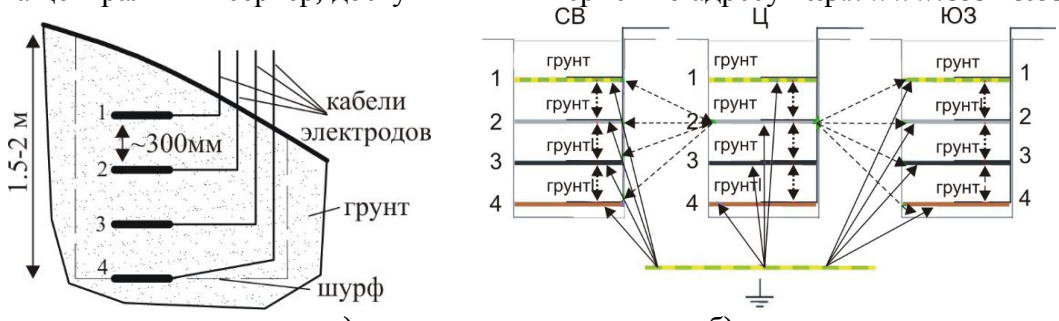
Измеряемой величиной является разность потенциалов между электродами в каждом шурфе, между электродами в различных шурфах и между каждым электродом и локальной землей. Общая схема измерений показана на рис.3б. Стрелками обозначены измеряемые разности потенциалов. Для схемы на рис.3б измеряемыми величинами являются 12 разностей потенциалов между каждым электродом и землей (стрелки со сплошной линией), 9 разностей потенциалов между электродами шурфа (3 для каждого шурфа, стрелки с точками) и 8 разностей потенциалов между вторым электродом центрального шурфа и каждым из электродов в северо-восточном и юго-западном шурфе (стрелки с пунктирами). Таким образом, измеряемыми являются 29 разностей потенциалов или, другими словами, 29 ПЭ ЭДС.

Измеряемыми величинами являются постоянная и переменная составляющая ПЭ ЭДС. Измерения выполняются в частотном диапазоне 0–4 кГц с использованием стандартных измерительных модулей.

В обозначениях измеряемых ЭДС указывается шурфы и номера электродов, между которыми проводятся измерения. Так, обозначение СВ2Ц3 означает разность потенциалов между электродом 2 северо-восточного шурфа и электродом 3 центрального шурфа.

К настоящему времени развернута сеть ПЭ-измерений (табл. 1, где ПК означает Петропавловск-Камчатский). Основная часть станций развернута на территории полуострова Камчатка. Еще две станции развернуты в предгорной части Алтая и на севере Крымского полуострова. Одна станция – в Италии.

Каждый пункт сети имеет в своем составе измерительный шурф и электронную регистрирующую систему, выполняющую измерения ПЭ ЭДС, персональный компьютер со специализированным ПО, выполняющим цифровую обработку сигналов и накопление результатов измерений в локальном архиве, а также 3G-роутер, обеспечивающий выход в сеть Интернет. Все станции сети работают в автономном режиме и осуществляют передачу данных на центральный сервер, доступный в Интернет по адресу http://www.cosmetecor.org.



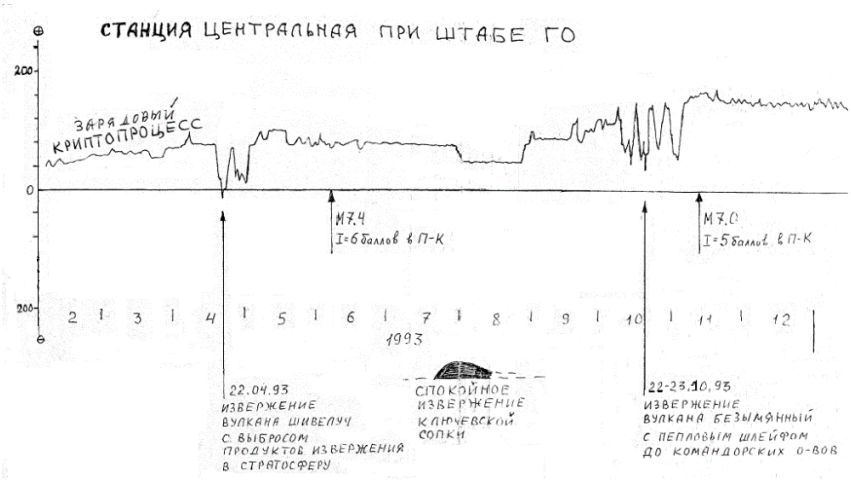
а) б)

Рис.3 а) Измерительный шурф: 1,2,3,4 – электроды, б) измеряемые разности потенциалов

Табл. 1 – Пункты сети ПЭ-измерений

Имя станции	Местоположение	Долгота, град. в.д.	Широта, град. с.ш.	Число ЭДС
S1-DESP_PK	ПК	158° 39' 10.86"	53° 03' 10.43"	16
S1-DESP_UZ	ПК	158° 39' 10.86"	53° 03' 10.43"	13
S1-IMFSET	ПК	158° 26'	53° 15'	16
S2-IMFSET	ПК	158° 38' 08.73"	53° 03' 12.54"	14
S3-IMFSET	ПК	158° 40' 12.13"	52° 59' 14.05"	16
S7-IMFSET	ПК	158° 40' 27.46"	52° 59' 3.43"	16
S4-IMFSET	Эссо, Камчатка	158° 42' 12.05"	55° 55' 15.65"	14
S5-IMFSET	Горно-Алтайск	85° 58'	51° 58'	16
S6-IMFSET	Кьети, Италия	14° 08' 50.66"	42° 22' 05.59"	16
S8-IMFSET	Крым	33.481°	45.768°	16

На рис. 3-4 показаны примеры нестационарных ПЭ-сигналов, предваряющие сильные землетрясения. Стрелкой показан момент землетрясения.



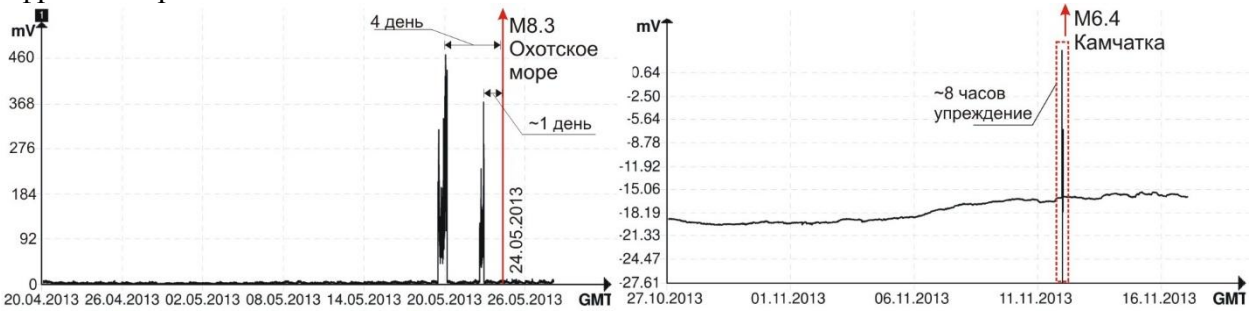
Из донесения, отправленного Д.А. Кузнецовым *30 мая 1994 года* факсом *в адрес заместителя начальника Управления научно-технических программ МЧС РФ д.физ-мат.н. Шахраманьяна М.А.*

Рис.3. – Данные станции «Центральная» В Петропавловске-Камчатском по протонной миграции, сейсмическая и вулканическая обстановка в 1993/1994гг

Дистантная школа «Космо-Метео-Тектоника» проводит непрерывный систематический анализ ПЭ- процессов на сети ПЭ-станций.

Анализ нестационарных ПЭ-сигналов, зарегистрированные перед сильными землетрясениями на Камчатке, позволяет сделать вывод о необходимости продолжения исследования и организации сети ПЭ-измерений с достаточным количеством территориально разнесенных измерительных станций, расположенных как в сейсмоопасных

районах, так и в асейсмических. При этом интерпретация данных, получаемых сетью, возможна с помощью электросетевых моделей (рис.2). Для территории РФ значительный интерес представляет установка станций в районе о.Байкал, на Кавказе, на Урале, в ЦФО. Дальнейшее развитие сети направлено на разработку экономичных малопотребляющих измерительных модулей, содержащих современные высокоскоростные процессоры цифровой обработки сигналов



а) б)

Рис. 4 – а) Сигнал S1-IFSET~ЮЗ23 перед ЗТ в Охотском море 24.05.2014г. с М8.3;
б) сигнал S3-IMFSET=СВ12 перед ЗТ на Камчатке 12.11.2013г. с М6.4

Литература:

1. Бобровский В.С., Кузнецов Д.А. Космометеотектоника. Главы 01-10.– ПК: Дистанц. шк. "КосмоМетеоТектоника",2011.–294с.–Деп. в ВИНИТИ 24.02.2011, № 82-В2011.
2. Bobrovskiy V.S. The results of subterranean electric measurements on Kamchatka as global effects of proton tectogenesis: damaging earthquakes in Indonesia and China / Ed. P.Guarnieri.–Recent Progress on Earthquake Geology.– 2011.– 257 p.– pp.189-248.
3. Кузнецов Д.А. Об отсутствии физических оснований для гипотезы термо-оптического способа передачи энергии в земных недрах. ПК: Институт вулканологии Дальневосточного Отделения Российской Академии Наук, 1992.– 5с.– Деп. в ВИНИТИ 12.10.92. №2954-В92.
4. Кузнецов Д.А. Комментарий к статье Ф.Ш. Кутыева «К энергетике геологических процессов-энерговоды»:Отсутствие физических оснований для гипотезы термооптического способа передачи энергии в земных недрах // Вулканология и сейсмология, 1993.–№4.–С.105-106.
5. Бот М. Прогноз землетрясений // Предсказание землетрясений. –М.: Мир, 1968. С. 9
6. Зейгарник В.А., Авагимов А.А., Тарасов Н.Т. Можно ли управлять землетрясениями? // Наука в России. – 1999. – №2. –С. 16-21
7. Николаев А.В. Как управлять землетрясениями? // Земля и Вселенная.–1999.–№3.– С. 18-25
8. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., В.А. Зейгарник Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. – 1999. – №4-5. –С. 152-160
9. Васильева Г.Я. К вопросу о природе солнечной активности / Г.Я. Васильева, Д.А. Кузнецов, А.А. Шпитальная // Солнечные данные. –1971. –№8. –С. 96-106.
10. Васильева Г.Я. К вопросу о влиянии галактических факторов на солнечную активность / Г.Я. Васильева, Д.А. Кузнецов, А.А. Шпитальная //Солнечные данные.–1972.– №2.–С. 99-106
11. Васильева Г.Я. Движение планет и солнечная активность/ Г.Я. Васильева, Д.А. Кузнецов, Н.С. Петрова, А.А. Шпитальная // Солнечные данные. –№8. – С. 106-115
12. Васильева Г.Я. К вопросу о годичных вариациях солнечной активности / Г.Я. Васильева, Д.А. Кузнецов, Н.С. Петрова, А.А. Шпитальная //Солнечные данные.– 1974.– №4.– С. 96-109.
13. Васильева Г.Я. К вопросу о физической природе солнечной активности / Г.Я. Васильева, Д.А. Кузнецов, Н.С. Петрова, А.А. Шпитальная // Сб. статей: Некоторые вопросы физики космоса. – М.: Наука, 1974. –С .45-54.
14. Кузнецов Д.А. Практика краткосрочного прогноза землетрясений: астрокосмогеофизические импульсы Вернадского-Власова-Воробьева-Пригожина на вертикальной последовательности подземных электродов в разломе «Пединститутский» на магнитном меридиане Петропавловска-Камчатского.– Петропавловск-Камчатский: КГПИ, 1991. –9 с. – Деп. в ВИНИТИ 30.07.91. –№3256-В91
15. Водород в металлах/Пер с англ. Под ред. Г.Алефельда и И.Фелькля. В 2-х томах.–М.: Мир, 1981.

УДК 556.33:550.348

ОЦЕНКА КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ 28 ФЕВРАЛЯ 2013 Г., M_W = 6.8 ПО ДАННЫМ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СКВАЖИНЕ ЮЗ-5, КАМЧАТКА

С.В. Болдина, Г.Н. Копылова*, boldina@emsd.ru,*
Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация. Рассматриваются и сравниваются два способа оценки косейсмической деформации при землетрясении 28 февраля 2013 г., Mw=6.8, произошедшем близ восточного побережья Камчатского полуострова: 1 - по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5 и 2 - по модели протяженного дислокационного источника в однородном упругом изотропном полупространстве с параметрами тензора сейсмического момента (СМТ) землетрясения. Полученные оценки объемной деформации близки по величинам амплитуды $-3.7\cdot10^{-9}$ и $-1.5\cdot10^{-9}$ и согласуются по знаку (сжатие). Это свидетельствует о высокой чувствительности вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 к изменениям напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород.

THE ESTIMATION OF COSEISMIC STRAIN AT THE EARTHQUAKE OF 28th FEBRUARY 2013, M_W=6.8 ON DATA OF WATER LEVEL OBSERVATIONS IN THE WELL UZ-5, KAMCHATKA

S.V. Boldina, G.N. Kopylova*, boldina@emsd.ru,*
Kamchatka Branch of Geophysical Service RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract. Two methods of estimating of a coseismic volume deformation at the earthquake of 28th February 2013, M_w=6.8 occurred near the east coast of the Kamchatka Peninsula are discussed and compared: 1 - according to data of water-level observations in the well UZ-5 and 2 - according to model of extended source of dislocation in a homogeneous isotropic elastic half-space with the parameters of seismic moment tensor (CMT) of the earthquake. Resulting estimates of volume deformation are similar in the values of amplitudes $-3.7\cdot10^{-9}$ and $-1.5\cdot10^{-9}$ and agreed on sign (compression). This indicates a high sensitivity of the water-level variations in the well UZ-5 to changes of stress-strain state of water-saturated rocks.

Образование разрывов в очагах землетрясений сопровождается не только излучением сейсмических волн, но и изменением статического поля напряжений на некоторой территории и, соответственно, косейсмической деформацией водовмещающих пород. Поэтому косейсмические скачки уровня воды, фиксируемые при уровнемерных наблюдениях в пьезометрических скважинах, можно рассматривать в качестве калибровочных сигналов, свидетельствующих о чувствительности наблюдательной скважины к изменениям напряженно-деформированного состояния среды и ее информативности при проведении геофизического мониторинга [1, 4].

Как показано в [1, 3-4] по амплитуде косейсмического скачка и по направлению изменения уровня воды можно оценить величину объемной косейсмической деформации водовмещающих пород в районе скважины и характер деформации (сжатие или расширение).

Камчатский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) проводит наблюдения на скважине ЮЗ-5. Ее координаты 53.169° с. ш., 158.414° в. д., глубина 800 м. Ствол скважины в интервале 310-800 м открыт и связан с водовмещающими породами, представленными метаморфизованными алевролитами и аргиллитами. Уровень воды находится на глубине около 1 м ниже поверхности земли. Наблюдения за вариациями уровня и атмосферного давления с интервалом 5 минут проводятся с использованием измерительного комплекса Кедр ДМ-У [2]. Обеспечивается точность измерений вариаций

уровня воды ±0.1 см. Более детальная информация о строении скважины и локальных гидрогеологических условиях приводятся в [1, 3-4] и на http://emsd.ru/lgi/places/.

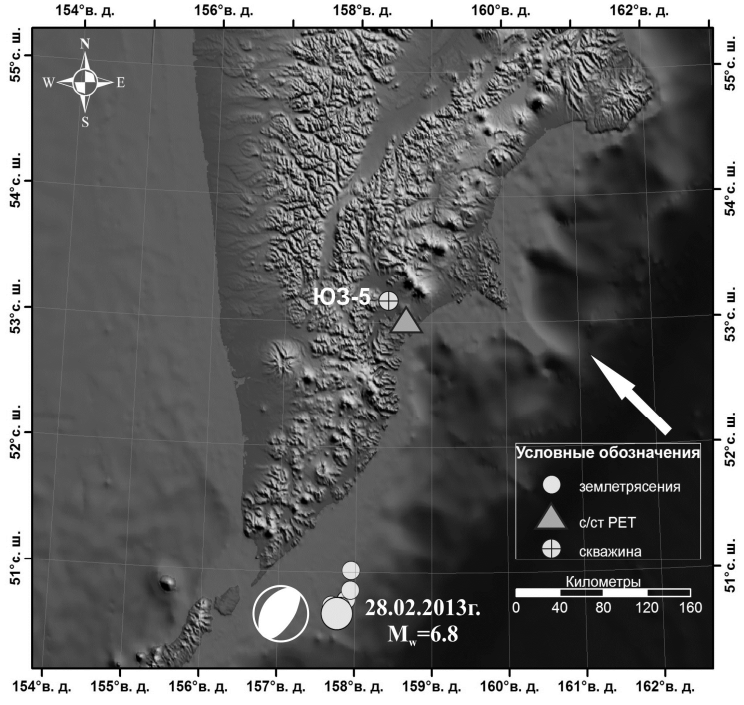


Рис. 1. Схема расположения скважины ЮЗ-5, с/ст. Петропавловск (РЕТ), эпицентров землетрясения 28 февраля 2013 г. и его сильнейших афтершоков. Показаны также механизм очага землетрясения и направление движения Тихоокеанской океанической плиты (стрелка).

28 февраля 2013 г. на расстоянии около 280 км от скв. ЮЗ-5 произошло землетрясение с магнитудой M_w=6.8 (табл.). Вступление сейсмических волн было зарегистрировано в 14:07 на сейсмостанции Петропавловск (с/ст РЕТ), расположенной на расстоянии 20 км от скважины (рис. 1). Интенсивность сотрясений в районе скважины составляла 4-5 баллов по шкале MSK-64 [5].

Параметры очага землетрясения 28.02.2013 г. (по данным http://www.globalcmt.org/)

Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс	Магнитуда M_w	Положение центроида			Плоскости подвижки		Угол подвижки λ_s, градусы	Скалярный сейсмический момент M_0, $Н·м·10^{20}$
			град. с.ш.	град. в.д.	Н, км	азимут простирания φ_s, градусы	угол падения δ, градусы		
28.02.2013	14:05:59	6.8	50.83	157.9	45.1	212/36	32/58	86/92	0.211

Оценка амплитуды косейсмического скачка в изменениях уровня воды. В скв. ЮЗ-5 после вступления сейсмических волн (14:07) в течение 50-ти минут происходило повышение уровня с амплитудой 2.3 см (рис. 2). Такое повышение уровня соответствует росту давления в системе «скважина – водовмещающая порода». Предполагалось, что такое повышение обусловлено наложением двух процессов: объемным сжатием водовмещающих пород при их косейсмическом деформировании, отжатием из них подземной воды и ее поступлением в ствол скважины, а также ростом порового давления при прохождении сейсмических волн. При этом физический механизм косейсмического скачка уровня соответствует отклику порового давления на упругую деформацию водовмещающих пород при образовании разрыва в очаге землетрясения [1, 4].

Механизм повышения давления, инициированного прохождением сейсмических волн, не вполне ясен. Можно предположить, что он связан с неоднородностью фильтрационных свойств водовмещающих пород, примыкающих к стволу скважины, и с кратковременным эффектом нелинейной фильтрации при прохождении сейсмических волн, сопровождающемся притоком воды в ствол скважины.

Для описания повышения уровня воды, вызванного прохождением сейсмических волн, использовалась затухающая экспоненциальная функция, которая ранее применялась

при анализе изменения уровня воды в скважине BV (США, Калифорния) в результате землетрясения Ландерс 28 июня 1992 г., M_w = 7.3 [7]:

$$u(t) = u_0[1–\exp(–t/t_r)], \quad (1)$$

где u_0 – максимальная амплитуда повышения уровня воды, t –время; t_r – константа. Такая зависимость изменения уровня воды во времени может характеризовать диффузионный процесс течения воды без конкретизации пространственного изменения поля давления, вызывающего приток воды в скважину. Вместе с тем, если наше предположение относительно механизма повышения уровня верно (кратковременное повышение давления в водовмещающей породе вблизи ствола скважины), то константа t_r в (1) может рассматриваться как параметр времени релаксации давления в системе «скважина – водовмещающая порода».

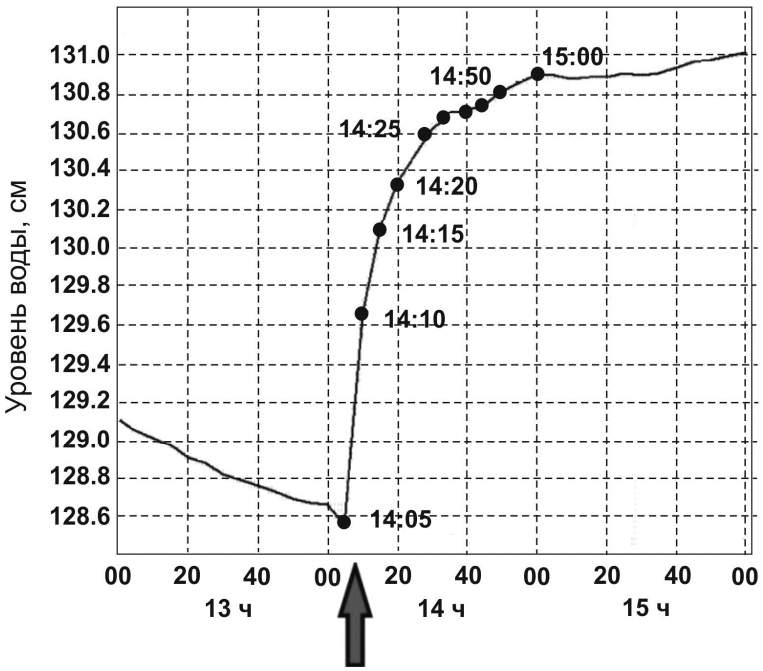


Рис. 2. Повышение уровня воды в скважине ЮЗ-5 после вступления сейсмических волн от землетрясения 28 февраля 2013 г. (показано стрелкой).

Для оценки амплитуды косейсмического скачка повышения уровня полагалось, что такой скачек произошел в период времени с 14:07 до 14:10 (рис. 2). Его амплитуда Δh определялась путем подбора модели повышения уровня воды с максимальной амплитудой 2.3 см, складывающейся из u_0, определяемой по (1), и Δh, т. е. с учетом условия $u_0 + \Delta h = 2.3$ см.

Расчетное повышение уровня воды в течение 50 минут хорошо согласуется с наблюденными данными при амплитуде косейсмического скачка $\Delta h = 0.6$ см, $u_0 = 1.7$ см и при величине t_r= 12 мин (рис. 3).

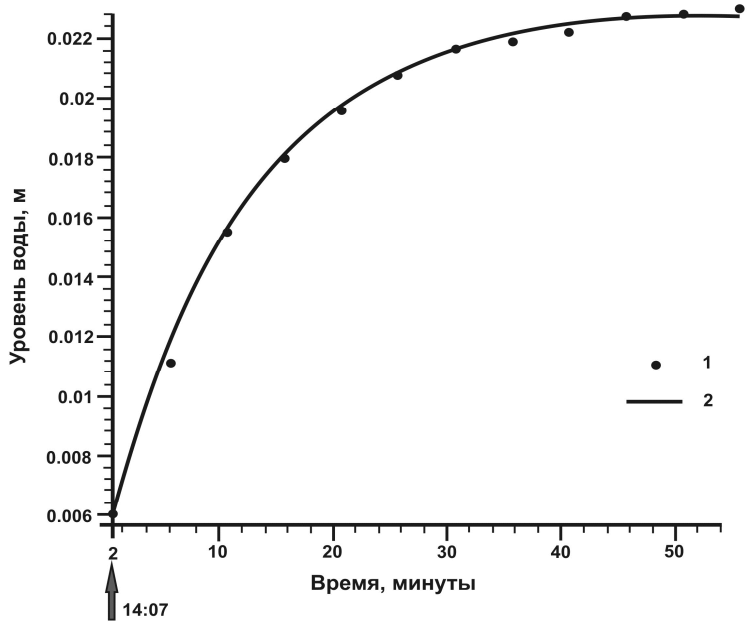


Рис. 3. Результаты моделирования повышения уровня воды в скважине ЮЗ-5 в течение 50 минут после вступления сейсмических волн от землетрясения 28 февраля 2013 г. (показано стрелкой) с учетом величины косейсмического скачка Δh=0.006 м: 1 – 5-минутные данные наблюдений; 2 – расчетное повышение уровня воды по (1).

Оценка величины объемной косейсмической деформации. Оценка величины объемной косейсмической деформации производилась по формуле [1, 3-4]:

$$D = -\Delta h/A_v, \quad (2)$$

где D – объемная деформация в единицах 10^{-9}: положительное значение соответствует расширению, отрицательное значение соответствует сжатию, Δh – амплитуда косейсмического скачка уровня воды в см: положительное значение соответствует повышению уровня воды, отрицательное значение соответствует его понижению, A_v – приливная чувствительность вариаций уровня воды по отношению к объемной деформации, см/10^{-9}.

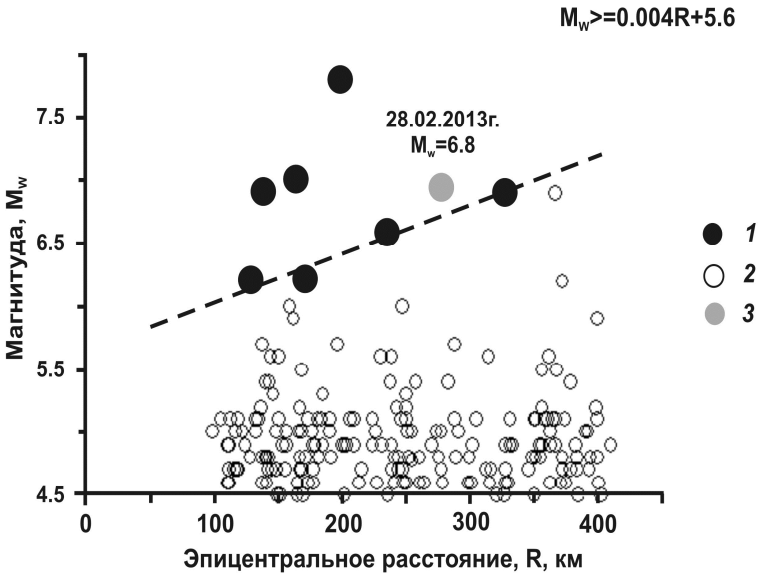


Рис. 4. Распределение землетрясений с $M_w \geq 4.5$, произошедших за время наблюдений на скважине ЮЗ-5, в зависимости от величин магнитуды M_w и эпицентрального расстояния R, км: 1 – землетрясения, сопровождавшиеся косейсмическим скачками уровня воды; 2 – землетрясения, в связи с которыми косейсмические скачки уровня не были зарегистрированы; 3 – землетрясение 28 февраля 2013 г.

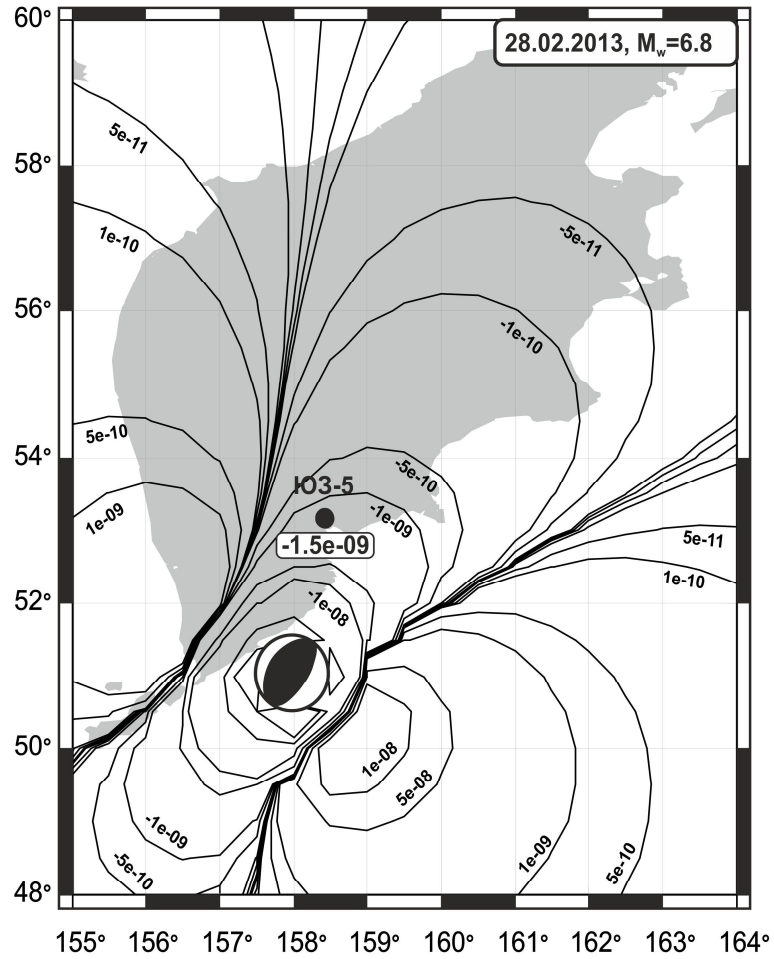


Рис. 5. Горизонтальное распределение объемной косейсмической деформации на глубине 500 м по модели дислокационного источника для землетрясения 28 февраля 2013 г., M=6.8 с указанием величин деформации в районе скважины ЮЗ-5 (показана черным кружком).

При оценке величины D по (2) использовались: величина приливной чувствительности вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 по отношению к объемной приливной деформации $A_v = 0.161$ см/10^{-9}, полученная по отклику уровня воды на суточную и полусуточную группы приливных волн по результатам приливного анализа вариаций уровня воды [1, 3-4]; и величина $\Delta h = 0.6$ см. Получена величина $D = -3.7 \cdot 10^{-9}$. По направлению изменения уровня воды (повышение) характер деформации водовмещающих пород соответствует их сжатию.

На рис. 4 представлена диаграмма и эмпирическая формула из [4], определяющие проявление косейсмических скачков уровня в скв. ЮЗ-5 в зависимости от соотношения величин магнитуды и эпицентрального расстояния землетрясений. Видно, что по соотношению магнитуды и расстояния событие 28 февраля находится в области параметров землетрясений, которые раньше всегда сопровождались косейсмическими скачками уровня. Данные по механизму очага землетрясения (табл., рис. 1) не противоречат гипотезе о преимущественном косейсмическом сжатии водовмещающих пород в районе скв. ЮЗ-5.

Теоретическая оценка величины объемной косейсмической деформации. Для землетрясения 28 февраля (табл.; рис. 1) была выполнена оценка объемной косейсмической деформации в окрестности скважины ЮЗ-5 по модели дислокации в однородном упругом изотропном полупространстве по алгоритму Okada, 1985 [6]. На рис. 5 представлено распределение по площади объемной косейсмической деформации на глубине 500 м, соответствующей средней глубине открытой части ствола скважины ЮЗ-5, через которую осуществляется связь скважины с водовмещающими породами. В районе скважины получена величина косейсмической деформации $-1.5 \cdot 10^{-9}$, что хорошо согласуется с величиной D по данным уровнемерных наблюдений.

Заключение. Полученное соответствие теоретических оценок косейсмической объемной деформации по модели протяженного дислокационного источника в однородном упругом изотропном полупространстве и экспериментальных оценок по данным уровнемерных наблюдений подтверждает высокую деформометрическую чувствительность вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 в диапазоне малых периодов и перспективность ее использования в системе геофизического мониторинга Камчатки.

Представленный способ оценки косейсмической деформации по данным уровнемерных наблюдений можно применять на других пьезометрических скважинах, расположенных в сейсмоактивных регионах и вскрывающих напорные подземные воды. Непременными условиями точечного оценивания косейсмической деформации при сильных землетрясениях по уровнемерным данным являются прецизионная и синхронная регистрация уровня воды и атмосферного давления с периодичностью не реже 5-10 минут, наличие и количественная оценка параметров приливного отклика в вариациях уровня воды, а также точное определение амплитуды косейсмического скачка уровня воды.

Список литературы

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Оценка косейсмической деформации при Кроноцком землетрясении 5.12.1997 г., Mw=7.8 по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. 12. С.95-102.
2. Калинов Г.А., Лысаков А.В., Римлянд В.И. и др. Автоматизированная система сбора гидрологической информации // Измерительная техника. 2012. № 2 (32). С. 92-99.
3. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52-64.
4. Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В., Сдельникова И.А. О возможности оценок косейсмической деформации по данным уровнемерных наблюдений в скважине // Физика Земли. 2010. № 1. С. 51-61.
5. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.В. и др. Сильное землетрясение 28.02.2013 г. у юго-восточного побережья Камчатки с магнитудой M_w=6.8 по данным оперативной обработки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. 21. С. 10-16.
6. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. of Seism. Soc. Amer. 1985. V. 75. P. 1135-1154.
7. Roeloffs E.A. Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 869-889.

УДК 550.831

МЕТОДЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ – ЭФФЕКТИВНЫЙ ЭКОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС В РАЙОНАХ НЕФТЕДОБЫЧИ

[1]М.Я. Боровский, [1]В.И. Богатов, [2]С.В. Шакуро, [1]Е.Г. Фахрутдинов

[1]- lilabor@vail.ru, ООО «Геофизсервис», Казань, Россия;

[2]- shakuro@frontgeo.ru, ООО «ФРОНТ-Геология», Ниж. Новгород, Россия)

Рассмотрены источники загрязнения недр в районах нефтепромысловых сооружений. Определены задачи эколого-геофизических наблюдений. При оценке эколого-гидрогеологической ситуации изучаемых территорий в центральной части Волго-Уральского нефтегазоносного региона эффективным является минимально-достаточный эколого-геофизический комплекс, включающий электроразведку методами сопротивлений и естественного электрического поля.

METHODS OF RESISTANCE AND NATURAL ELECTRICAL POTENTIALS - EFFECTIVE ECOLOGICAL AND GEOPHYSICAL COMPLEX IN THE AREAS OF OIL PRODUCTION

[1]M.Y. Borovsky, [1]V.I. Bogatov, [2]S.V. Shakuro, [1]E.G. Fakhrutdinov

[1] - lilabor@vail.ru LLC, "Geofizservis", Kazan, Russia

[2] - shakuro@frontgeo.ru, LLC "FRONT-Geology", Nigny Novgorod, Russia

The sources of subsurface contamination in areas of oilfield facilities. Defined objectives of the ecological and geophysical observations. When assessing ecological and hydrogeological situation in the study area in the Central part of the Volga-Ural oil-gas region is effective minimally adequate ecological and geophysical complex including prospecting methods resistances and natural electric field.

Территории деятельности нефтедобывающих компаний относятся к регионам с большой техногенной нагрузкой на экосистему. Здесь, как правило, расположено большое количество опасных в экологическом отношении производств, таких как товарные парки, ДНС, КНС, ГЗУ, глубокие скважины различного назначения, сеть трубопроводов. Очаги техногенного загрязнения подземных и поверхностных вод действует на протяжении длительного времени (в Урало-Поволжье с 50-х годов прошлого столетия).

Для предотвращения подземных вод от загрязнения проводятся мероприятия по их защите. Первым профилактическим звеном служит организация системы гидромониторинга экологического состояния подземных вод

Составной и важной частью этих работ является проведение наземных геофизических исследований методами электроразведки.

Среди поверхностных источников загрязнения выделяются (К.С. Харьковский, 1998) первичные и вторичные. К *первичным* относятся [1,3,4] техническое оборудование и коммуникации. Утечки из трубопроводов, негерметичности приустьевого оборудования скважин, фильтрация из земляных амбаров и т.п., служат основной причиной попадания рассолов в зону аэрации или водоносные горизонты.

В качестве *вторичных* рассматриваются длительно существующие линзы засоленных грунтов, сформировавшиеся в зоне аэрации под воздействием на нее первичных источников загрязнения.

Пространственно эти два источника загрязнения, как правило, совпадают, с распространением вторичного очага загрязнения вниз по разрезу, до кровли регионального водоупора «лингуловые глины», однако при пересеченном рельефе могут быть существенно разобщены

Задачами электроразведки при изучении очагов засоления подземных вод являются:

- поиски и оконтуривание *вторичных* источников поступления загрязняющих компонентов в водоносные горизонты;
- обнаружение скрытых *первичных* источников: скважин с некачественным техническим состоянием, порывов напорных трубопроводов;
- изучение особенностей геологического строения территории.

Важным становится поиск и оконтуривание низкоомных аномалий удельного электрического сопротивления грунта в приповерхностных слоях разреза. Такие аномалии, как правило, идентифицируются как зоны локализации подземных вод, обладающих повышенной минерализацией. Утечки и проливы нефтепродуктов в настоящее время – основной фактор загрязнения верхней части геологического разреза.

Зоны интенсивного загрязнения нефтепродуктами картируются [4-8] по высоким значениям кажущейся поляризуемости и по пониженным значениям удельного сопротивления по сравнению с вмещающими породами.

Комплексные полевые геофизические исследования в составе эколого-гидрогеологических работ проводятся в области питания и разгрузки загрязненных родников (используемых для наблюдения за экологическим состоянием зоны пресных подземных вод). Площадные измерения выполняются по сети 100–200–250 на 100–200–250 м по профилям поперёк склона. В состав полевых электроразведочных работ входят:

- опорные наблюдения ВЭЗ;
- симметричное электрическое профилирование СЭП в площадном варианте;
- измерения методом естественного поля ЕП на выделенных скважинах с ненадежным техническим состоянием (отсутствие цемента за кондуктором и эксплуатационной колонной, плохое качество цементного камня, зафиксированные нарушения и заколонная циркуляция), по четырем взаимно перпендикулярным лучам (способ потенциала).

Симметричное электрическое профилирование СЭП (на двух разносах) используется в качестве основного метода. Для уточнения данных о геологическом строении участка работ выполняются вертикальные электрические зондирования ВЭЗ.

Принимая во внимание вероятность отображения областей загрязнения горных пород в виде участков пониженного сопротивления, при эколого-геологическом истолковании геофизических материалов данное положение принимается в качестве основного критерия. Результаты электропрофилирования на малых разносах позволяют оконтурить в плане области относительно пониженных кажущихся сопротивлений, которые рассматриваются как предполагаемые участки приповерхностного загрязнения. Карты изолиний $\rho_к$, построенные по значениям, полученным на больших разносах АВ, несут информацию о более глубоких горизонтах, позволяя коррелировать и изучать выявленные аномалии на глубину.

Анализ характера изменения естественного электрического поля способствует диагностике загрязнения районов нефтепромысловых сооружений. В 90-х годах прошлого столетия теоретически обоснованы и разработаны методики проведения и интерпретации результатов метода ЕП при выявлении и оценке источников загрязнения водоносных горизонтов. В Татарстане профессором Казанского университета Э.К. Швыдкиным (1996) показана принципиальная возможность изучения очагов и ореолов распространения загрязняющих подземные воды веществ с поверхности при наличии соответствующей аппаратуры и техники [1,8]. Проведение измерений методом ЕП у скважин обеспечивает качественную оценку [7,8,9,10] движения водного потока вдоль ствола скважин (для выявления восходящих, либо нисходящих перетоков).

Многочисленные исследования, полевые съемки, компьютерное моделирование [8] позволили схематизировать структуру фильтрационного поля при наличии и отсутствии заколонных перетоков в скважинах. Выделяется [1,8] три типа распределения естественных электрических потенциалов:

1. Фильтрация осуществляется из нижних горизонтов в верхние. Наличие заколонных перетоков «снизу» регистрируется повышенными значениями потенциалов над скважиной.

2. Инфильтрация поверхностных вод и загрязняющих флюидов через ослабленные зоны вдоль ствола скважины. Присутствие перетоков «сверху-вниз» характеризуется пониженными величинами электрического поля.
3. Отсутствие фильтрации вдоль ствола скважины. Локальных аномалий ЕП не отмечается.

Эффективность комплекса электроразведочных работ базируется на результатах авторов, полученные в центральных районах Волго-Уральского нефтегазоносного региона, в области питания родников, где выявлены зоны наиболее подверженные техногенному загрязнению (засолению). На глубоких скважинах выполнена качественная оценка движения водного потока вдоль ствола скважин (для выявления восходящих, либо нисходящих перетоков).

Методом вертикального электрического зондирования (максимальный разнос АВ достигает 310 м) изучен интервал разреза, включающий образования пермского и четвертичного возрастов. Получена геоэлектрическая характеристика отложений верхней части гидрогеологического разреза.

По материалам симметричного электропрофилирования (разносы 30 м и 100 м) выделены зоны, характеризующиеся относительно пониженными значениями кажущегося сопротивления. Наиболее низкоомные участки в этих аномальных зонах ($\rho_к$ менее 30 Ом·м) интерпретируются (В.И. Богатов, М.Я. Боровский и др., 2007) как возможные очаги загрязнения (засоления).

Обращает внимание приуроченность выявленных зон загрязнения к скважинам глубокого бурения имеющимся на территории исследований.

В плане наблюдается соответствие зон загрязнения для различных уровней (глубин) горизонтального среза (АВ=30 м, АВ=100 м).

Участки совпадения зон загрязнения на различных глубинах являются первоочередными для постановки детальных эколого-гидрогеологических наблюдений.

По результатам электроразведки ЕП, выполненной на устьях скважин, прогнозируется наличие восходящей и нисходящей фильтрации.

Таким образом, электрическая разведка, включающая методы сопротивлений (установки ВЭЗ, СЭП) и естественных потенциалов ЕП дает важные сведения о техническом состоянии нефтепромысловых сооружений и характере загрязнения вод зоны активного водообмена

Литература

1. Боровский, М.Я. Геоэкология недр Республики Татарстан: геофизические аспекты / М.Я. Боровский, Н.Х. Газеев, Д.К. Нургалиев; под ред. Д.К. Нургалиева. – Казань : Экоцентр, 1996. – 316 с.
2. Петрова Г.И. Гидрогеологические условия зоны активного водообмена центральной части Южно-Татарского свода в связи с разработкой нефтяных месторождений: автореф дисс.соискания уч.степени к.г.-м.н.: 25.00.07 / Петрова Гузель Инзировна. – Пермь: ПГУ, 2004. – 25 с.
3. Геофизические методы исследований в гидрогеологии и инженерной геологии. – М. : Недра, 1985. – 250 с.
4. Гидрогеоэкологические исследования в нефтедобывающих районах Республики Татарстан / под ред. А.И. Короткова, В.К. Учаева. – Казань : Изд-во Репер, 2007. – 300 с.
5. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности / под ред. проф. В.А. Шевнина и доц. И.Н. Модина. – М. : РУССО, 1999. – 511 с.
6. Шакуро, С.В. Применение геофизических методов при изучении техногенных линз нефтепродуктов / С.В. Шакуро // Разведка и охрана недр. – 2005. – №8. – С. 24–26.
7. Электроразведка : Справочник геофизика. – М., Недра, 1979. – 518 с.
8. Чернышева, М.Г. Метод электрических потенциалов фильтрации в решении гидрогеологических и экологических проблем в нефтепромысловых регионах РТ : автореф. дисс. соискание уч. степени к.г.-м.н.:04.00.12 / Чернышева Марина Геннадьевна. – Казань: КГУ, 1999. – 24 с.
9. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики / А.А. Огильви. – М. : Недра, 1990. – 501 с.
10. Семенов, А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля / А.С. Семенов. – Л. : Недра, 1980. – 446 с.

УДК 552.1:551.14(477)

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ УКРАИНСКОГО ЩИТА ПО МАТЕРИАЛАМ РТ-ПЕТРОФИЗИКИ, ГСЗ И ГРАВИМЕТРИИ

П.А. Буртный, В.А. Корчин*, Korchin@igph.kiev.ua*
Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

The results petrophysical modeling by basis on the comparison ofexperimental data of elastic waves speed changes in rocks and their density at the different conditions of experimtnts with materials of the deep seismicsounding andgravimetry are examintd. The prognosis geological cut of the area of the Earth's crust of the central part of the Ukrainian shield along the DSS profile is built.

Особенности строения глубинных горизонтов земной коры не доступных бурению, основываются на анализе материалов геофизических исследований, которые характеризуются состоянием и физическими свойствами слагающих эти горизонты пород. Используемая нами методика петрофизического моделирования, базируемая на сопоставлении экспериментальных данных об изменении скорости упругих волн и плотности горных пород в РТ-условиях, соответствующих термобарическим режимам земной коры исследуемых регионов, с материалами ГСЗ и гравиметрии [1, 2]. Методика позволяет перейти от данных о физических свойствах глубинных горизонтов коры к определению возможного состава пород, слагающих эти горизонты, и построить прогнозный разрез коры, отражающий, в какой-то мере, реальную геологическую обстановку данного региона.

Для петрофизического моделирования взят профиль ГСЗ, проходящий в субмеридиональном направлении в пределах осевой антиклинальной части Ингульского мегаблока, которую образуют Корсунь- Новомиргородский (на севере) и Новоукраинский (на юге) массивы(блоки) [3, 4]. Фундамент Корсунь-Новомиргородского блока сложен анортозит-рапакиви-гранитовым комплексом пород (75-80% площади занимают граниты рапакиви). Основные породы габбро-анортозитового состава выходят на поверхность в некоторых местах в виде отдельных массивов. На юге блок граничит с Новоукраинским по Субботско-Мошоринскому разлому. Фундамент последнего сложен розовыми трахитоидными новоукраинскими гранитами (собственно Новоукраинский массив северной части блока) и порфировидными кировоградскими гранитами (Бобринецкий массив в южной его части). На севере и юге породы указаных блоков по разломам сочленяется с нижнепротерозойскими осадочно-метаморфическими толщами пород ингуло-ингулецкой серии.

Верхним горизонтам коры вплоть до границы K_2 присущи более контрастные различия сейсмических скоростей по латерали, которые хорошо согласуются с особенностями поверхностной геологии указанных массивов. В целом по скоростным параметрам земная кора ниже границы K_2 разделена на два блока, которые соответствуют массивам, выделяемым по геологическим данным.

Для петрофизического моделирования отобрана коллекция наиболее характерных пород, развитых в этом районе, а также поверхностные аналоги предполагаемых глубинных минеральных образований. Изучены изменения в них скорости упругих волн и плотности в программных РТ-условиях опытов, соответствующих их распределению в земной коре региона.

Выполнено сопоставление скоростей сейсмических волн, характерных для отдельных горизонтов и блоков коры с экспериментально полученными для определенных типов пород и построены для них прогнозные колонки возможного состава на всю мощность коры (рис. 1). Следует отметить, что такое сопоставление и построение разреза было проведено с учетом геолого-структурных особенностей района. В частности, состав нижних горизонтов

коры прогнозировался с учетом данных о ее двухэтажном строении, нижний этаж которой является гранулитовым [5]. Если взять за основу гипотезу о палингенно-метасоматическом образовании пород гранит-анортозитовых комплексов, которые широко развиты в этом районе , то предложенная петроскоростная модель, основанная на данных ГСЗ и материалах экспериментальных, хорошо согласуется с этими положениями [6-7].

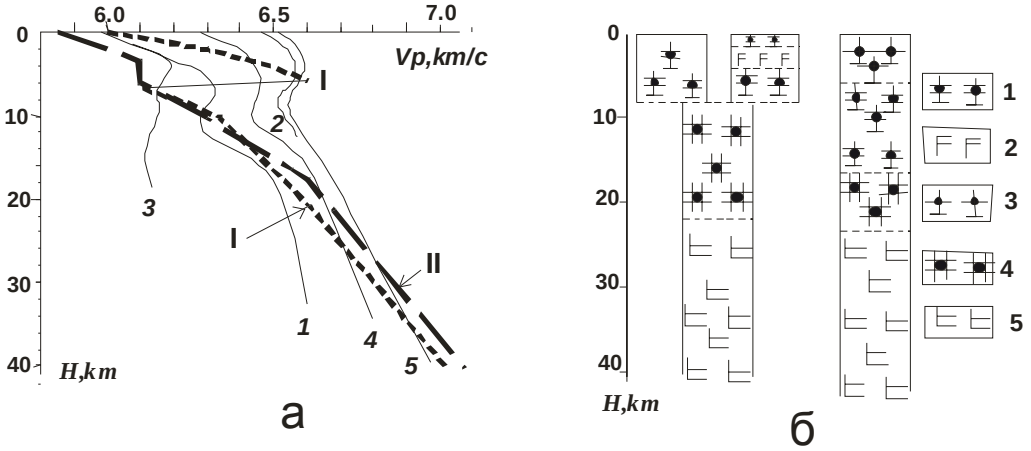


Рис.1. Графики изменения скорости упругих волн (а) и литологические колонки (б) прогнозируемого состава земной коры исследуемого района. I, II – изменение скорости сейсмических воло с глубиной в земной коре Корсунь-Новомиргородского и Новоукраинского массивов; 1-5 – экспериментальные данные изменения скорости упругих волнс глубиной в породах: 1-граниты рапакиви, 2-анортозиты, 3 граниты новоукраинские, 4-эндербиты, 5-основные гранулиты.

Для получения более точной информации о характере распределения и составе пород было проведено петроплотностное моделирование на данном участке профиля. Исходя из предполагаемого состав коры, по данным экспериментальных исследований изменения плотности пород в РТ-условиях, соответствующих термобарическим условиям коры, был построен ее плотностной разрез. Исходя из полученных данных о плотностных характеристиках выделенных ранее горизонтов пород была расчитана величина гравитационного поля вдоль профиля, которая сопоставлялась с полученной при гравиметрических исследованиях. Характер совпадения наблюденного и расчетного графиков корректировался путем изменения в допустимых пределах значений плотности выделяемых слоев (±0,01г/см^3), а более точное совмещение изменением мощности тел и их конфигурации.

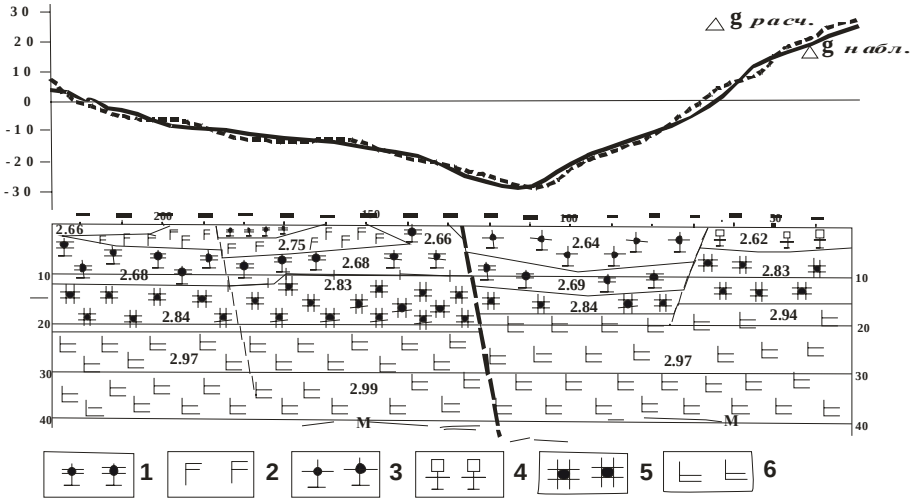


Рис. 2. Прогнозный геологический разрез участка земной коря центральной части Украинского щита. 1-граниты рапакиви, 2-анортозиты, 3-граниты новоукраинские, 4-граниты кировоградские, 5-эндербиты, 6-основные гранулиты; 2,83-средние значения

плотности для выделяемых толщ пород, Δg- графики аномального наблюденного и расчетного значения плотности.

В результате предлагаемого петрофизического моделировани получен вещественный разрез участка земной коры исследуемого района (рис. 2), который в какой-то мере приближает нас к реальной геологической обстановке, существующей здесь в настоящее время.

Литература

1. Буртный П.А., Корчин В.А., Карнаухова Е.Е. Моделирование вещественного состава глубинных горизонтов земной коры (новая концепция интерпретации геофизических данных). – LAP Lambert Akademic Publishing, 2013. – 188 с.
2. Термобарическое петрофизическое моделирование в петрофизике. – Киев: Наукова думка, 2013. – 312 с.
3. Крюченко В.А., Половинкин Б.В., Трипольский А.А. Глубинное строение земной коры центральной части Украинского щита по профилю ТСЗ Николаев-Канев // Геофизический журнал. — 1981. — 3, № 2. — С. 82—88.
4. Геологическая карта кристаллического основания Украинского щита. Масштаб 1:500000. Объяснительная записка. — Киев, 1983. — 101 с.
5. Щербаков И.Б. Петрология Украинского щита. — Львов: ЗУКЦ, 2005. — 364 с.
6. Лутц Б. Г. Петрология глубинных зон континентальной коры и верхней мантии. — Москва: Наука, 1974. — 300с.
7. Коваль В.Б., Валасис А.Г. Проблема анортозит-рапакиви-гранитной формации // Геологический. — 1989 — № 2. — С. 48—54.

УДК 530. 34

О НАДЕЖНОСТИ ПРОМЫШЛЕННО-ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ В РАЙОНАХ С ПОВЫШЕННЫМ СЕЙСМИЧЕСКИМ РИСКОМ

Е.Н. Быцань, *byzan@ukr.net*
Институт геофизики им С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

Вопрос о надежности сооружений в районах с повышенным сейсмическим риском в значительной мере определяется с помощью математической модели взаимодействия сейсмической волны с фундаментом сооружения

ON RELIABILITY OF INDUSTRIAL AND ECONOMIC BUILDINGS IN AREAS WITH HIGH SEISMIC RISK LEVEL

Je.N. Byzan*, byzan@ukr.net*
Institute of Geophysics by S.I. Subbotin name NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

Reliability of buildings in areas with high seismic risk level are largely defined with the help of the mathematical model of relation of seismic wave with the building foundation.

Надежность больших промышленно-хозяйственных сооружений в районах с повышенным сейсмическим риском является одной из самых важных прикладных задач строительной механики. Под надежностью понимают способность определенного промышленного сооружения (системы) выполнять свои заданные функции на протяжении определенного обусловленного времени при заданных условиях эксплуатации [1]. Невозможность системы выполнять свои функции называют отказом. Причины отказа есть выход нормативных параметров системы за определенные границы, которые делает невозможным выполнять ее функции.

Надежность зависит от структуры объекта и его параметров. Самая важная задача надежности есть исследование долговечности (безаварийности) роботы системы. Для этого нужно проанализировать работу всех элементов системы и выяснить, от каких факторов зависит работоспособность системы на протяжении заданного (гарантированного) времени. Исторически о надежности стали говорить в 50-х годах XX столетия, но эти вопросы были актуальными с давних времен. Тогда речь шла, прежде всего, о долговечности сооружений, которая включала в себе как технологические вопросы, связанные со свойствами материалов, с которых возводились сооружения, так и все иные вопросы, которые относились к технике строительства. Еще следует заметить, что вопрос о долговечности приобрел особый теоретический аспект после разработок основ теории упругости и ее прикладных вариантов - сопротивления материалов и строительной механики.

Надежность является качественной абстрактной характеристикой, которая не является физическим параметром и не может быть замерена никакими приборами. Она может быть подсчитанной с помощью определенного алгоритма для определения искомой характеристики исследуемого объекта. Разработка этого алгоритма и есть целью исследования задачи о надежности промышленного объекта. Гарантия работоспособности сооружения дается с помощью математической модели промышленно-хозяйственного объекта, с помощью которой прогнозируется изменение нормативных параметров на протяжении расчетного термина работы сооружения. Сущность надежности проявляется в безотказности, долговечности и ремонтоспособности промышленно-хозяйственных сооружений.

Понятие безотказности, долговечности и надежности промышленно-хозяйственных сооружений тесно связаны между собою. Они являются взаимодополняющими в том смысле, что вероятность отказа γ_1 и вероятность безотказной работы γ_2 удовлетворяют такому соотношению: $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$.

Требование к надежности заключатся в том, что должны учитываться все возможные ситуации. Могут быть непредсказуемые ситуации, которые учитываются с помощью теории риска путем введения коэффициентов запаса. Отказы могут быть случайными или закономерными в зависимости от того прогнозируемые они условиями эксплуатации промышленно-хозяйственных объектов и могут быть учтены технологически, или имеют случайный непредсказуемый характер. В первом случае отказ зависит от условий и режима эксплуатации, когда определенные элементы промышленно-хозяйственного объекта имеют гарантийный термин работы меньший от термина работы этого объекта в целом, что требует плановой замены, или планового ремонта этих элементов. Еще следует заметить о необходимости постоянного мониторинга смещений, деформаций и напряжений в самых важных элементах сооружения с целью не пропустить опасную ситуацию вследствие возникновения напряжений, которые превышают расчетные значения, и могут приближаться к критическим.

Параметры промышленно-хозяйственных объектов определяются с определенными погрешностями и носят случайный характер, вследствие чего границы для параметров, которые определяют допустимые значения, которые гарантируют безотказную работу сооружения, подсчитываются и оцениваются с помощью вероятностных методов. Они имеют определенную специфику, а потому нужно четко знать возможности этих методов, вследствие чего существует две стороны применения вероятностных и статистических методов - переоценка роли статистических методов и их недооценка. Сущность проблемы в том, что статистические методы целесообразно применять в случае массовых событий. В задачах строительной механики, задачах сейсмостойкости имеем место с конкретными объектами, а потому не имеют место массовые события.

Промышленно-хозяйственное сооружение усложняется с увеличением количества ее составляющих, и есть смысл разбивать его на отдельные блоки, заменяя связь между ними определенными усилиями, и исследуя надежность работы каждого с этих блоков в отдельности. В этом случае для исследования надежности нужно исследовать цепочку - надежность, отказ, риск, коэффициент запаса всех блоков промышленно-хозяйственного объекта.

Одним из самых важных вопросов есть сейсмостойкость сооружения (объекта). Основной задачей сейсмостойкости есть исследование взаимодействия механических (волновых) процессов с промышленно-хозяйственными сооружениями [2, 3]. Все сводится к определению критической величины сейсмического импульса, порожденного сейсмической волной, особенности которой зависят от свойств среды, в которой они распространяются, параметрами землетрясения, расстоянием к эпицентру, поглощающими свойствами среды и т.п. Информация о величине сейсмического импульса (удара) необходима для определения напряжений и деформаций в элементах промышленно-хозяйственных сооружений. Главная сложность проблемы заключается в том, что сейсмические волны невозможно описать аналитически, что необходимо при решении динамической задачи строительной механики. Учет случайного характера сейсмической волны требует применение методов теории вероятности. Сложность проблемы вызвана тем, что о природе землетрясения и механизме взаимодействия сейсмической волны и сооружения имеем очень мало достоверной информации. Задача сводится к статистическому анализу взаимодействия сейсмической волны на сооружение и определении вероятности выхода сооружения из эксплуатации, чем и занимается теория надежности. Импульс не должен превышать критических значений в том плане, что вызванные им деформации и напряжения должны быть меньшими от критических значений, которые вызывают необратимые разрушения в элементах сооружения. Еще нужно учитывать окончательные деформации от землетрясений, их накопление после серии сейсмических импульсов. Вообще необходим мониторинг за состоянием сооружения с целью недопущения аварийных ситуаций.

Важное значение имеют оценки точности. Речь может идти о точности математической модели, которая зависит от многих факторов. Прежде всего речь идет об учете всех

моментов, от которых зависит решение динамической задачи теории упругости - краевые условия, механические параметры, пренебрежение величинами, влияние которых имеют одинаковый порядок с погрешностями механических параметров. Точность математической модели определяет точность определения смещений, напряжений и деформаций, которые являются одними с самых важных нормативных параметров, с помощью которых можно сделать заключения о надежности промышленно-хозяйственного сооружения. Еще следует заметить, что вопрос точности решения динамической задачи строительной механики достаточно многогранный. Во-первых, влияние погрешности вследствие неточности механических параметров материалов. Во-вторых, погрешности вследствие упрощений в математической модели. Суммарные погрешности могут быть достаточно значительными - например, расчетные собственные частоты сооружения могут существенным образом отличаться от экспериментально полученных [4].

Еще заметим, что любая конструкция в процессе эксплуатации испытает определенный риск. Риск включает большой круг вопросов, которые можно разбить на три группы: риск, вызванный природными факторами, риск, связанный с деятельностью человека - человеческий фактор, и риск, вызванный хозяйственной деятельностью. К первой группе относятся задачи сейсмостойкости. Вторая группа вопросов сводится к построению математической модели, с помощью которой анализируются все риски, которые возникают при работе промышленно-хозяйственных сооружений, и которые учитываются при построении инженерного решения. Заметим, что рассчитанные с помощью математической модели напряжения и деформации не совпадают с реальными. Теория риска подсчитывает риски для различных вариантов расчетов с тем, чтобы выбрать оптимальный, для которого риск будет минимальным. Внешние силы оцениваются за своими максимальными значениями и вследствие этого конструкция становится бо габаритной и дорогой. Теория риска преследует цель уменьшить стоимость сооружения не уменьшая ни в коем случае ее прочность. Это достигается путем уменьшения механических параметров системы, не уменьшая критических значений ее параметров. Третья группа связана с хозяйственной деятельностью, и учитывает вероятность отрицательного влияния этих объектов на его работу. Риск подсчитывается для событий, которые могут состояться с определенной вероятностью. Риск связан с затратами на строительство и зависит от большого комплекса причин, прежде всего от назначения, условий работы и времени эксплуатации хозяйственного комплекса. Риск подсчитывается для неизвестных и случайных элементов (событий), которые влияют на роботу исследуемого объекта, причем случайным событием будем считать такое прогнозируемое событие, которое может наступить с определенной вероятностью в отличие от события, что не рассматривается как возможным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Половко А.М. Основы теории надежности / Половко А.М. - Москва: Наука, 1976. 277 с.
2. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике / Болотин В.В. - Москва: Стройиздат, 1965. 280 с.
3. Медведев С.В. Инженерная сейсмология / Медведев С.В. - Москва: Стройиздат, 1978. 204 с.
4. Карапетян Б.К. Колебания сооружений, возведенных в Армении / Карапетян Б.К. Ереван: Айастан, 1967, - 172 с.

УДК 550.831

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ГЕОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

С.Г.Бычков, *bsg@mi-perm.ru*
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Уральского отделения Российской академии наук,
г. Пермь, Россия

В настоящее время можно считать, что сформировалось новое направление в теории интерпретации потенциальных полей, получившее название интерпретационной томографии. Разработаны многочисленные методы, которые позволяют разделять интерпретируемое поле на составляющие, отождествляющиеся с влиянием разноглубинных слоев горных пород при минимуме априорной информации об источниках, получить трехмерную картину распределения физических свойств пород и локализовать источники аномалий в пространстве. Однако геологическая интерпретация 3D изображений поля не должна сводиться к нанесению на срез объемных моделей полей контуров геологических объектов и стратиграфических границ. Только использование методов количественной интерпретации позволяет из 3D модели поля создать физико-геологическую модель геологического разреза.

GEOLOGICAL INTERPRETATION OF TOMOGRAPHIC TRANSFORMATION GEOPOTENTIAL FIELDS

S.Bychkov, *bsg@mi-perm.ru*
Mining Institute of the Ural Branch Russian Academy of sciences
Perm, Russia

At present, we can assume that a new direction in the theory of interpretation of potential fields, called interpretive imaging. Numerous methods have been developed that allow to share in the interpretive field components are identified with the influence of pelagic rock layers with a minimum of a priori information about the sources, a three-dimensional picture of the distribution of the physical properties of rocks and locate the sources of the anomalies in space. However, the geological interpretation of the 3D image of the field should not be reduced to the application of the shear volume models fields contours of objects and geological stratigraphic boundaries. Only the use of methods allows quantitative interpretation of field to create 3D models of physical and geological model of the geological section.

Векторное сканирование геопотенциальных полей, реализованное в компьютерной технологии VECTOR, было создано в Горном институте УрО РАН под руководством В.М. Новоселицкого более 20 лет назад [1, 2]. Одним из основных достоинств векторного сканирования, которая определила большую ее востребованность в практике геофизических работ, является возможность получить трехмерную картину распределения физических свойств пород и локализовать источники аномалий в пространстве.

В настоящее время разработаны многочисленные алгоритмы формирования трехмерных моделей различных параметров (характеристик) потенциальных полей, имеющие целью пространственное отображение строения геологической среды, и можно считать, что сформировалось новое направление в теории интерпретации потенциальных полей, получившее название интерпретационной томографии [3, 4]. Векторное сканирование классифицируется как один из вариантов фильтрационной томографии геопотенциальных полей [3].

Методы интерпретационной томографии весьма привлекательны для геофизиков, поскольку они позволяют разделять интерпретируемое поле на составляющие, отождествляющиеся с влиянием разноглубинных слоев горных пород при минимуме

априорной информации об источниках, не требуют трудоемких процедур построения начального приближения, необходимых в классических методах автоматизированного подбора поля, используют сравнительно быстрые вычислительные алгоритмы, допускающие обработку больших объемов исходной информации. Кроме того, широкий выбор способов визуализации результативных интерпретационных построений дает возможность построения различных вариантов пространственных распределений геоплотностных (геомагнитных) неоднородностей в исследуемом объеме среды. Возможность хотя бы приближенно совмещать трехмерные модели характеристик геопотенциальных полей с моделями геологической среды облегчает анализ природы геофизических аномалий и выводит его на новый качественный уровень.

Одна из таких методик томографической интерпретации, разработанная в Казахстане, основана на осреднении гравитационного поля с многократной полосовой фильтрации и реализована в компьютерной системе объемного гравиметрического моделирования СПОГМ. [5]. В основе расчета объемных моделей поля лежит многократная полосовая фильтрация с постепенным изменением параметров фильтра в сторону низких частот. Значительное число алгоритмов объемного преобразования полей реализовано в комплексе программ спектрально-корреляционного анализа данных COSCAD-3D [6].

Сопоставление различных методик томографических преобразований гравитационного поля в геологических условиях Прикаспийской впадины позволило оценить возможности их использования для повышения эффективности интерпретации гравитационного поля при изучении солянокупольных структур [7]. Эксперименты выполнены на участке гравиметрической съемки, расположенном в центральной части Прикаспийской впадины, где развита интенсивная соляная тектоника. На площади проведены также сейсмические исследования по редкой сети профилей. По одному из сейсмических профилей, график аномалий силы тяжести по которому представлен на рис. 1 а, выполнены различные томографические преобразования гравитационного поля. Результат, полученный в системе СПОГМ (поле G3D2) и увязанный с данными сейсморазведки, представлен на рис. 1 б. Положение кровли и подошвы соленосной толщи, показанное на разрезе черными линиями, получено на основе решения обратной задачи гравиразведки методом подбора и согласовано с сейсмическим разрезом. На рис. 1 в и 1 г представлены соответственно вертикальные сечения 3D диаграмм поля, полученные в системах VECTOR и COSCAD-3D.

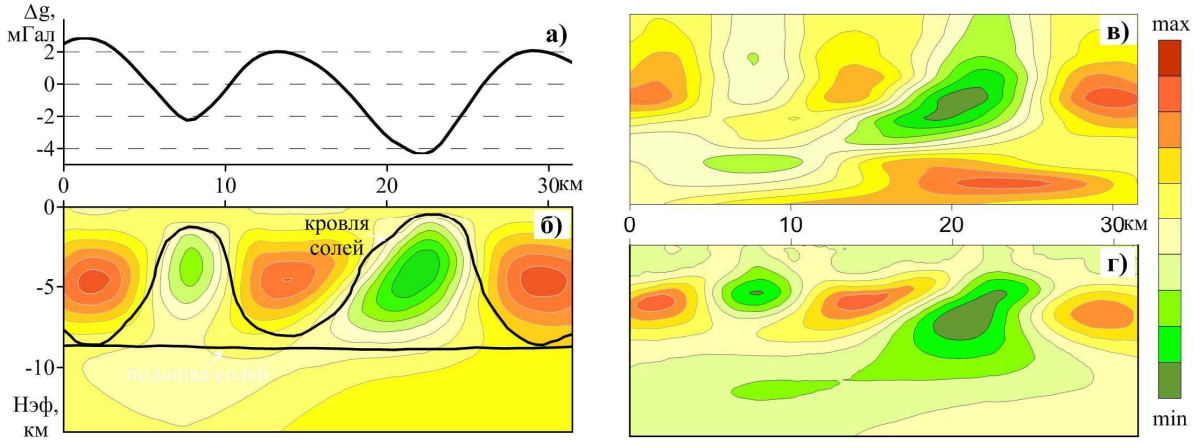


Рис. 1. Сопоставление методов послойного разделения гравитационного поля: а) - график гравитационного поля по сейсмическому профилю; б) - система СПОГМ (поле G3D2, увязанное с данными сейсморазведки); в) - система VECTOR; г) - система COSCAD-3D (пересчет поля в нижнее полупространство)

Выполненный анализ показал, что объемные преобразования поля, реализованные в системах COSCAD-3D, VECTOR и СПОМГ, дают сопоставимые результаты при изучении соляных куполов Прикаспийской впадины. Использование алгоритмов томографической интерпретации для моделирования соляных куполов достаточно эффективно и дает

ориентиры для более корректного проведения границ сейсмических отражающих горизонтов, например, при оценке кровли соляной толщи в межкупольном пространстве, определения вертикальных границ соляных куполов.

Однако с теоретических позиций все методы интерпретационной томографии выглядят весьма уязвимо [4]. Возможности любых алгоритмов фильтрации для оценки глубин залегания аномалиеобразующих тел ограничены зависимостью спектральных характеристик гравитационного поля не только от глубины, но и от геометрических параметров источников. Кроме того, размерность вектора результатов превышает размерность вектора исходных данных, что нарушает информационную корректность томографических методов. По образному выражению А.В. Матусевича [5] томографические трансформанты поля представляют собой «гравиметрическое изображение геологической среды». А.И.Кобрунов [8] применяет термин «модель эффективного параметра», который не имеет размерность конкретного физического параметра и не соответствует истинному геологическому разрезу. Тем не менее, в последнее время все чаще появляются работы, где томографические срезы поля представлены как геологические разрезы с нанесенными на них стратиграфическими границами и разрывными нарушениями [9, 10] или даже с залежами углеводородов [11]. Такой подход к интерпретации результатов томографических преобразований поля совершенно не допустим. Как отмечает Ю.И.Блох: «Чем более замысловатой является примененная трансформация, тем более причудливыми являются *нереальные* распределения источников [12, стр. 125].

Глубинная привязка источников аномалий, выделенных при томографических преобразованиях возможна только с учетом априорной геологической информации, например путем томографических преобразований результатов решения прямой задачи для известных гравиактивных границ, на основании которой возможен выбор параметров трансформации наблюденного поля силы тяжести, или выбор параметров трансформации по корреляционной зависимости между трансформантами поля и параметрами геологического разреза, полученными по скважинным или сейсмическим данным [13]. Как видно из рис. 2, гравитационные эффекты от нижнепермских и девонских рифов локализуются при различных коэффициентах трансформации в системе VECTOR, что позволяет разделить соответствующие эффекты.

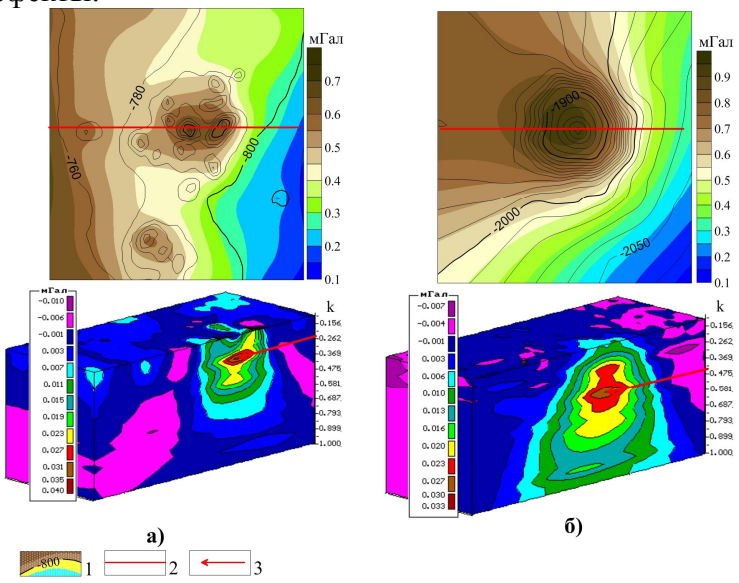
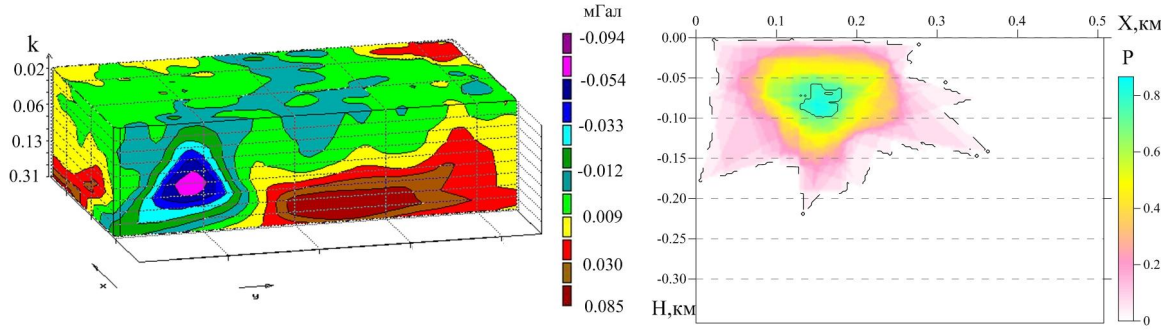


Рис. 2. Решение прямой задачи гравиразведки и трансформация модельных полей в системе VECTOR: а) пермские рифы; б) девонский риф: 1 – структурная карта гравиактивной границы (заливкой показан соответствующий гравитационный эффект), 2 – линия вертикального сечения 3D диаграммы поля, 3 – «глубина» экстремума аномалии

Одним из вариантов уменьшения неоднозначности интерпретации является совместное применение качественных и количественных методов интерпретации

гравиметрических данных: разделение поля формальными процедурами на серию «разноглубинных» компонент предлагается осуществлять с учетом решения обратной задачи, а само решение обратных задач проводить с использованием результатов разделения полей [14]. На начальной стадии интерпретационного процесса для построения изображения геологической среды используется система томографического преобразования поля, которая позволяет получать пространственное распределение квазиплотности, отражающее некоторые элементы физико-геологической модели. Результаты векторного сканирования используются для уточнения геологических гипотез и задания априорных ограничений при последующем решении обратной задачи.

На рис 3 представлены результаты интерпретации изометричной отрицательной аномалии силы тяжести, обусловленной провалом земной поверхности в г.Березники. На трехмерной диаграмме поля, полученной в системе VECTOR (рис.3а), отчетливо выделяется источник данной аномалии как изолированной тело с пониженной плотностью. Количественный расчет проведен, исходя из предположения о том, что отрицательная локальная аномалия обусловлена одним объектом, залегающим в интервале глубин от 5 м до 300 м, обладающим аномальной плотностью от –0.02 г/см^3 до –2.0 г/см^3. Пунктирной линией на рис. 3б оконтурена сравнительно широкая область, в пределах которой располагаются все допустимые решения обратной задачи. В пределах этой области изолинией вероятности p = 0.8 локализовано наиболее вероятное местоположение источника. Центр области разуплотнения зафиксирован на глубине 80 м, т.е. в надсоляной толще пород. Расчет выявил, что задача имеет решение только при границах аномальной плотности от -0.02 г/см^3 до -0.90 г/см^3.



а б

Рис. 3. Результаты интерпретации гравиметрических данных в районе провала в г. Березники: а) трансформанта поля в системе VECTOR, б) результат количественной интерпретации локальной аномалии

Таким образом, результаты томографических преобразований поля могут использоваться только для уточнения геологических гипотез и задания априорных ограничений при последующем решении обратной задачи. Модель геологического разреза, полученная при решении обратной задачи, обладает реальными пространственными координатами и характеризует распределение аномалиеобразующих масс в изучаемом объеме геологической среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новоселицкий В.М., Маргулис А.С., Чадаев М.С. Использование гравиметрической градиентной съемки для локализации плотностных неоднородностей // Геофизические работы при региональных и геологосъемочных исследованиях на Урале - Свердловск, 1989. - С 33-35.
2. Новоселицкий В.М., Чадаев М.С., Погадаев С.В., Кутин В.А. Метод векторного сканирования //Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа: межвуз. сб. науч. тр. - Пермь, ПГУ, 1998. - С. 54-59.

3. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Интерпретационная томография по данным гравиразведки и магниторазведки в пакете программ «СИГМА-3D» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Международного семинара им. Д.Г. Успенского. - М., ОИФЗ РАН, 2004. – С. 88-89.
4. Долгаль А.С., Бычков С.Г., Костицын В.И., Новикова П.Н., Пугин А.В., Рашидов В.А., Шархимуллин А.Ф. О теории и практике томографической интерпретации геопотенциальных полей // Геофизика, 2012, №5. – С. 8-17.
5. Матусевич А.В. Гравиметрическое изображение солянокупольного структурного этажа Прикаспийской впадины // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского. - Екатеринбург, ИГф УрО РАН, 2006. - С. 208-211.
6. Петров А.В., Пискун П.В., Зиновкин С.В. Новые возможности компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа геоданных «КОСКАД 3Dt» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Междунар. семинара им. Д. Г. Успенского. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2005. - С. 219-221.
7. Матусевич А.В., Бычков С.Г., Жунусов Д.Е., Простолупов Г.В. Анализ эффективности методов гравитационной томографии при изучении солянокупольных структур прикаспийской впадины // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского – Пермь, ГИ УрО РАН, 2015. – С. 138-140.
8. Кобрунов А.И. Математические основы теории интерпретации геофизических данных: учебн. пособие. М.: ЦентрЛитНефтеГаз. 2008. 288 с.
9. Гололобов Ю.Н., Атаков А.И., Кирсанов А.А. Геоиндикация неоднородностей Земной коры по гравитационным, магнитометрическим и космогеологическим данным при поисках полезных ископаемых // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского – Казань, КГУ, 2009. – С. 100-102.
10. Баньковский М.В., Гейхман А.М. Метод волновой аппроксимации потенциальных полей при прогнозировании, поиске и разведке месторождений углеводородов в Украине // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского – Пермь, ГИ УрО РАН, 2015. – С. 15-18.
11. Копылов А.В., Крекнин С.Г., Суханов А.Б., Погрецкий А.В. Результаты высокоточной гравиразведки при поисках углеводородов в Волго-Уральской нефтегазоносной провинции // Геофизика, 2011, №4. – С. 64-67.
12. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий: учебн. пособие. М. 2009. – 232 с.
13. Бычков С.Г. Методы обработки и интерпретации гравиметрических наблюдений при решении задач нефтегазовой геологии – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. - 187 с.
14. Бычков С.Г., Долгаль А.С., Симанов А.А. Синтез качественных и количественных методов извлечения геологической информации из гравиметрических данных // Горный журнал, 2013, №6. - С. 26-29.

УДК 550.837

НЕКОТОРЫЕ РАЗРАБОТКИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПОЛЯ ТОКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

В.С. Вишнев, А.Г. Дьяконова, О.В. Сурина*, sur2004@inbox.ru*
Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Рассмотрена методика полевых и камеральных геофизических работ, основанная на измерении поля токов электрической железной дороги. Приведены примеры ее экспериментального опробования.

SOME ELABORATIONS ON APPLICATION OF THE FIELD OF ELECTRIFIED RAILWAY CURRENTS FOR SOLVING GEOLOGICAL PROBLEMS

V.S. Vishnev, A.G. Dyakonova, O.V. Surina*, sur2004@inbox.ru*
Institute of Geophysics of the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The theoretical basics are stated and the characteristic features are considered. The examples of tentation of the stray currents from electric railways prospecting method are shown.

Введение. Практика геофизических работ показывает, что поле токов электрической железной дороги (ЭЖД), как правило, неоднородно в пространстве и нестабильно во времени. Это неблагоприятно для его применения в электроразведке. Однако в [1] установлено, что из совокупности данных измерения помех от ЭЖД можно выделять однотипные по структуре источника сигналы. Упомянутые сигналы, задавшись моделью их возбудителя (т.е., осуществив его математическое описание), поддаются преобразованию в значения кажущегося сопротивления, профильные распределения которого (кривые $\rho_к$) легко интерпретировать количественно.

Ниже приводятся приемы, позволяющие использовать ЭЖД в качестве детерминированного электроразведочного источника.

1.*Методика и техника полевых работ*. Для регистрации поля - помех от ЭЖД (в излагаемом варианте применения) хорошо подходит любая серийная, широкополосная, цифровая или аналоговая, многоканальная электроразведочная аппаратура, например, магнитотеллурическая станция GMS 06. Измерение помех производится по ортогональным преимущественному направлению ЭЖД профилям одновременно в двух или нескольких пунктах местности, один из которых является базисным. Базисный пункт размещают около такого отрезка пути, где электровозы вынуждены изменять свой режим энергопотребления (движения). Такими отрезками бывают остановочные пункты, подъемы, мосты, переезды и другие элементы дороги. Регистрируют взаимно перпендикулярные составляющие электрической (E_x, E_y) и магнитной (H_x, H_y, H_z) напряженности поля, а также время, направление и особенности следования поездов по контролируемому участку. За движением поездов наблюдают непосредственно с базисного пункта. Результаты заносят в полевой журнал.

2.*Выделение полезных сигналов из помех от ЭЖД*. Чтобы выделить полезные сигналы из помех от ЭЖД нужно, используя сведения о времени и характере движения поездов, содержащиеся в полевом журнале, отобрать на цифровых или аналоговых записях поля базисного и рядовых пунктов наблюдения соответствующие импульсы и снять их амплитуды. Вычислить значения отношений взаимно перпендикулярных составляющих магнитных и (или, если магнитные каналы отсутствуют) электрических амплитуд базисного пункта, ранжировать их и разбить на интервалы. Подсчитать количество импульсов, попавших в тот или иной интервал, и построить гистограммы распределений этих отношений (рис.1*в, г*). Импульсы рядовых пунктов, соответствующие импульсам базисного пункта, образующим экстремумы гистограмм, будут, вероятно, сигналами, структура источника которых одна и та же. Для приведения однотипных по структуре источника

сигналов к одной и той же его интенсивности строят графики функций $\Delta E_{хр}(\Delta H_{уд})$, $\Delta E_{ур}(\Delta H_{хд})$, $\Delta E_{хр}(\Delta H_{ур})$, $\Delta E_{ур}(\Delta H_{хр})$ и т.п., где д – базисный (долговременный), р – рядовой пункт, Δ – символ импульса поля. Они представляют собой прямые линии, идущие из начала координат (рис.1*д*). Тангенсы углов наклона этих прямых к осям абсцисс и есть полезные сигналы, источник которых и по структуре и по интенсивности один и тот же.

3.*Преобразование полезных сигналов в величины кажущегося сопротивления*. Общее математическое выражение, по которому рассчитываются экспериментальные значения кажущегося сопротивления ($\rho_к$), имеет вид [1]:

$$\rho_к = \frac{G_j}{P_i} \cdot \frac{\Delta E_i}{\Delta H_j};\ i = x, y;\ j = y, x.$$

Оно распадается на формулы:

$$\rho_{к,x} = (G_{ур} / P_{хр}) \cdot (\Delta E_{хр} / \Delta H_{ур}), \quad \rho_{к,y} = (G_{хр} / P_{ур}) \cdot (\Delta E_{ур} / \Delta H_{хр}),$$

$$\rho'_{к,x} = (G_{уд} / P_{хр}) \cdot (\Delta E_{хр} / \Delta H_{уд}), \quad \rho'_{к,y} = (G_{хд} / P_{ур}) \cdot (\Delta E_{ур} / \Delta H_{хд}),$$

где дроби слева – величины, играющие роль коэффициентов электроразведочной установки, справа – полезные сигналы. Результаты расчетов используются для построения продольных ($\rho_{к,y}$) и поперечных ($\rho_{к,x}$) кривых этого параметра (*y* – вдоль, *x* - поперек преимущественного направления рельсового пути). Причем кривые $\rho_{к,x}$ лучше подходят для изучения геоэлектрического разреза по вертикали, $\rho_{к,y}$ - по горизонтали. Те и другие из них можно интерпретировать как на качественном, так и на количественном уровне.

4.*О точности построения кривых* $\rho_к$ *по данным измерения помех от ЭЖД*. Для того чтобы рассчитать кривые $\rho_{к,x}$, $\rho_{к,y}$ надо задаться моделью источника полезного сигнала. Физически она во многих случаях может состоять из бесконечного, прямолинейного рельсового пути с параметром *k*, равным корню квадратному из отношения погонного сопротивления рельса к погонному сопротивлению перехода рельс – земля (грунт), одной секции контактного провода, длиной *L*, электровоза, изменяющего режим энергопотребления в точке с координатой l_0, и, максимум, двух тяговых подстанций. Расчетные формулы поля токов этой модели приведены в [1]. Они использованы, в частности, при изучении влияния модельных погрешностей, а также – погрешностей координат пунктов наблюдения, на ход кривых $\rho_к$. Установлено, для получения практически значимых кривых $\rho_{к,x}$, $\rho_{к,y}$ достаточно обеспечить: задание длины секции контактного провода (*L*) с ошибкой до нескольких единиц процентов, задание координаты места изменения тяговой нагрузки электровозов (l_0) - с ошибкой не более десятков - первой сотни метров, задание координат $x_м$ - с ошибкой до 10 – 15 метров, задание координат $y_м$ – с погрешностью, не превышающей 20 - 30 % (М – пункт измерения), а параметра *k* – с погрешностью до 10 - 12 %. Что на практике вполне осуществимо.

5.*Результаты экспериментального опробования предлагаемых приемов*. Всего по методике, приближенной к обсуждаемой методике, пока произведено три полевых эксперимента. Они выполнялись попутно с ее разработкой. Их первоочередными целями были: ***а***) выявление возможности выделения однотипных по структуре источника (полезных) сигналов из помех от ЭЖД; ***б***) подтверждение преимуществ нормировки импульсов электрических составляющих к магнитным составляющим упомянутых сигналов; ***в***) доказательство перспективности использования в геофизической разведке техногенного поля не только электрических железнодорожных веток горнодобывающих предприятий, как в стандартном варианте метода блуждающих токов (МБТ), являющемся прототипом, но и поля электрических железнодорожных веток магистрального (междугороднего) назначения; ***г***) демонстрация возможности количественной интерпретации данных измерения помех от ЭЖД. Решение же геологических задач было не главным. Однако и на этапе разработки новой методики МБТ, как оказалось, получены практически значимые результаты [1, 2]. В

качестве примера рассмотрим данные полевых работ, выполненных на южном Урале и изображенных на рис. 1.

Измерения помех проводились над зоной контакта Еманжелинско-Бородиновского синклинория Восточно-Уральского прогиба земной коры с Троицко-Кенгусайским мегантиклинорием Зауральского поднятия и над зоной чередования сильно вытянутых в северо-северо-восточном направлении антиклинальных и синклинальных структур западной части Зауральского поднятия, перекрытых неравномерной по мощности толщей слабо измененных мезозойско-кайнозойских рыхлых отложений [4]. Палеозойское консолидированное основание исследуемой территории подвергнуто значительным дислокациям и изобилует разного рода разрывными нарушениями, часть из которых была выделена впервые только по гравимагнитным данным [5] и нуждалась в подтверждении.

Помехи наблюдались синхронно двумя магнитотеллурическими станциями. Одна станция все время измерений стояла в пункте, расположенном на расстоянии примерно 0,7 км от железнодорожного (ЖД) моста через реку Верхний Тогузак (долговременный или базисный пункт), другая – разворачивалась (поочередно) на точках профиля (рядовые пункты), идущего вдоль дороги, соединяющей поселки Бородиновка (на западе) и Алексеевка (на востоке). Регистрировались две составляющие электрического (E_x, E_y) и три составляющие магнитного (H_x, H_y, H_z) поля, а также время, направление и особенности движения (ускорение, торможение) электровозов на подступах к ЖД мосту. Топографическая привязка сети наблюдений была картографической. Сведения об особенностях движения поездов определялись визуально и записывались в полевой журнал.

Обработка экспериментальных материалов производилась точно так, как изложено в разделе 2. Выделенные из помех сигналы, согласно выше приведенной формуле, были пересчитаны в величины $\rho_к$. Распределение $\rho_к$ вдоль профиля наблюдения изображено на рис.1*б*. Там же дан фрагмент геологической схемы с нанесенной на нее сетью геофизических работ. Фрагмент (рис.1*а*) составлен с использованием геологической карты Урала масштаба 1:500000 [3] и графического изображения структурных особенностей его южной территории под названием: «Схема внутреннего строения фундамента платформы и складчатых структур Южного Урала по геолого-геофизическим данным» [5].

Сравнивая рис.1*а* и рис.1*б* нетрудно заметить, что пониженным значениям параметра $\rho_к$ соответствуют глубинные разломы консолидированного основания Уральских структур и места повышенных мощностей рыхлых пород. Так, локальный минимум кривой $\rho_к$ между пунктами наблюдения 4 – 9 обусловлен, вероятно, Джетыгаринским глубинным разломом (шифр 2 на рис. 1*а*) и приконтактовой зоной Восточно-Уральского прогиба и Зауральского поднятия. Минимум в пунктах 28 – 33 – повышенной мощностью рыхлых отложений и предполагаемым глубинным разломом, выделенным впервые И.С. Огариновым по гравимагнитным данным [5].

Достоверность связи приконтактовой зоны Восточно-Уральского погружения и Зауральского поднятия с понижением электрического сопротивления горных пород подтверждается и данными интерпретации кривых магнитотеллурического зондирования (МТЗ), полученных на Троицком профиле ГСЗ (глубинного сейсмического зондирования) [6]. Выделение этой аномалии методом МТЗ на упомянутом профиле оказалось возможным благодаря ее расположению вне сферы сильного влияния ЭЖД (на 15 – 20 км западнее железной дороги).

Обосновать наличие проводящей зоны, выделенной при анализе измерений техногенного поля ЭЖД между пунктами 28 - 33, по материалам МТЗ Троицкого профиля ГСЗ не представляется возможным, так как она находится в сфере действия интенсивных импульсных помех. Однако, ее существование не вызывает сомнений, ибо подтверждается результатами МТЗ, полученными позднее на профиле Уралсейс, расположенном южнее, где она так же удалена от железной дороги [6].

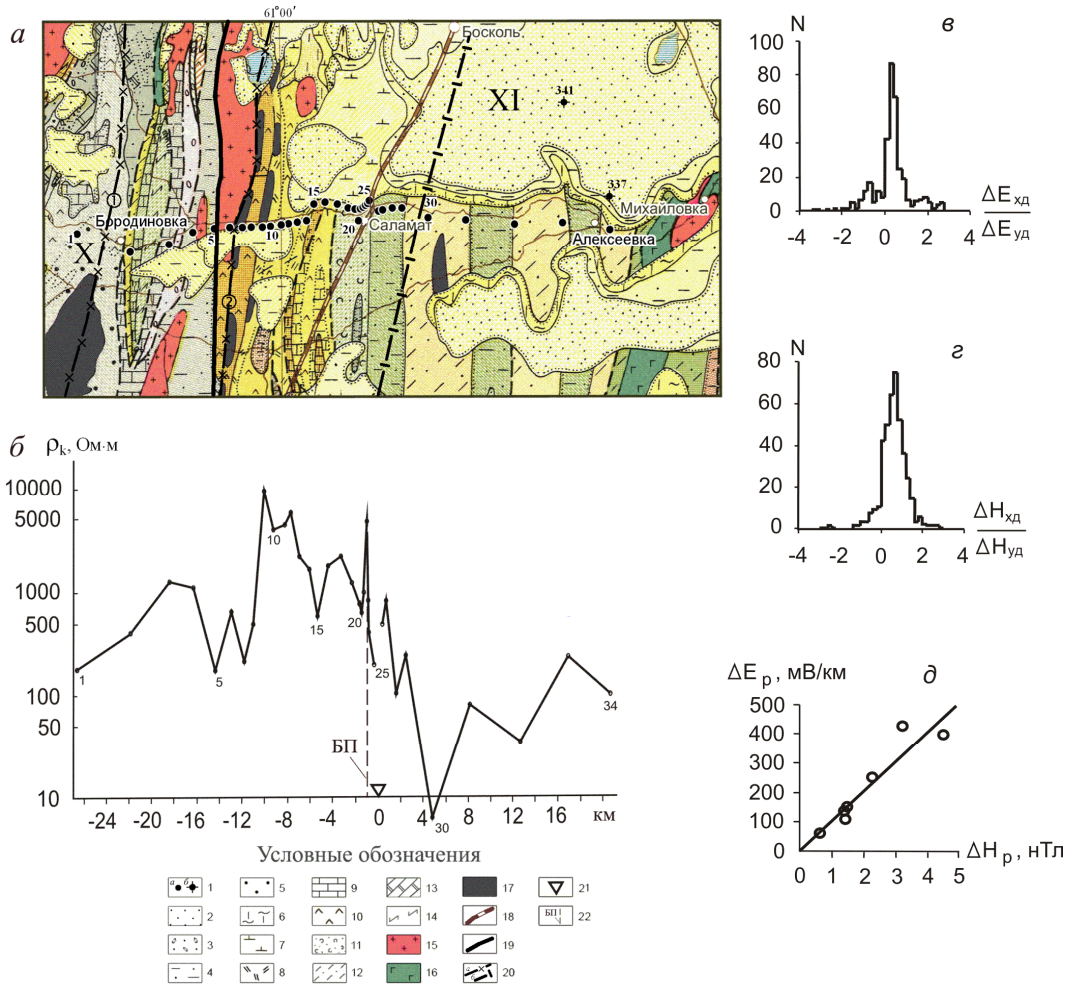


Рис. 1. ***а*** – фрагмент схематической геологической карты до мезозойского складчатого фундамента Урала с расположением сети электромагнитных исследований [3]. ***б*** – кривая ρ_k. ***в, г*** – гистограммы распределений отношений взаимно перпендикулярных составляющих электрических и магнитных импульсов поля ЭЖД. ***д*** – пример выделения полезного сигнала из электрических помех. **1**–пункты наблюдения поля ЭЖД (*а*), МТЗ (*б*); **2**–пески и алевриты; **3**–конгломераты и песчаники; **4**–глины, песчаники, алевролиты, аргиллиты и сланцы глинистые, углисто-кремнисто-глинистые; **5**–угленосные толщи, песчаники, различные парасланцы, гравелиты, конгломераты; **6**–опоки с прослоями песчаников и алевролитов, опоковидные глины; **7**–диатомиты, глинистые диатомиты; **8**–яшмы, кремнистые сланцы; **9**–известняки; **10**–базальты, диабазы, андезитобазальтовые, базальтовые порфириты, их туфы, туфобрекчии, туффиты, туфопесчаники; **11**–осадочно-вулканогенные толщи: туфы разного состава, туфопесчаники, кремнистые и глинистые сланцы; **12**–филлито-кварцитовые толщи: углисто-кремнисто-глинистые парасланцы, кварцито-песчаники, зеленые сланцы; **13**–мраморы; **14**–сланцы разного состава, гнейсы; **15**–граниты, плагиограниты, гранодиориты; **16**–габбро-диабазы, интрузивные диабазы, **17**–сильно серпентинизированные ультрабазиты, серпентиниты; **18**–железнодорожные пути; **19**–граница структур I порядка. X - Восточно-Уральский прогиб, XI – Зауральское поднятие, **20**–зоны глубинных разломов, выделенных по геолого-геофизическим (*а*) и по гравимагнитным (*б*) данным [5]: ① – Успенско-Павловский, ② – Джетыгаринский, **21**–железнодорожный мост через реку В-Тогузак, **22**–базисный пункт

Следовательно, используя изложенные выше методические приемы, удалось пополнить сведения о геоэлектрическом разрезе Южного Урала новыми данными в месте, малодоступном для применения стандартных методов электроразведки.

Полученные данные оказались полезными при создании стартовых моделей геоэлектрического разреза Земли по геотраверсам Троицкий профиль ГСЗ и профиль Уралсейс, необходимых для интерпретации данных МТЗ в рамках двухмерного подхода.

Заключение. Из выше изложенного следует, что выделение однотипных по структуре источника сигналов из помех от ЭЖД и представление их распределений в виде кривых кажущегося сопротивления являются вполне осуществимыми и весьма полезными методическими приемами. Эти приемы позволяют (по крайней мере, при стечении благоприятных обстоятельств) использовать для решения геологических задач не только техногенное поле транспортных систем горнодобывающих предприятий, но и поле железных дорог междугороднего (магистрального) назначения, и получать в рамках метода блуждающих токов материалы, пригодные как для качественной, так и для количественной интерпретации.

Литература

1. Вишнев В.С. Приемы полевых и камеральных работ в методе электроразведки блуждающими токами тяговой сети железной дороги // Уральский геофизический вестник. УрО РАН: Екатеринбург. 2012. № 2 (20). С. 14 - 30.
2. Вишнев В.С., Дьяконова А.Г., Сурина О.В. Использование полей - помех электрифицированной железной дороги при электроразведочных исследованиях // Известия вузов. Горный журнал № 3, 2014. С. 103 - 109.
3. Геологическая карта Урала масштаба 1:500000, лист 18. Главный редактор Соболев И.Д., М.: 1979. 24 листа.
4. Геология СССР том XII, часть I, книга 2. М.: Недра, 1969. 302 с.
5. Огаринов И.С. Строение и районирование Земной коры Южного Урала. М.: Наука, 1973. 85 с.
6. Дьяконова А.Г., Иванов К.С., Астафьев П.Ф., Вишнев В.С., Коноплин А.Д. Геоэлектрические особенности строения земной коры и верхней мантии Южного Урала // Геология и геофизика, т. 48, №10, 2007, С. 1086 - 1095.

УДК 550.36.553.041:553.98

ГЕОТЕРМИЯ КАК МЕТОД РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ (НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНКИ ПОИСКОВЫХ ПЕРСПЕКТИВ РЕЗЕРВУАРОВ УВ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА И ФУНДАМЕНТА)

А.В. Власова[1], Г.А. Лобова[1], Е.М. Ахметов[2], В.И. Исаев[1]

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, avv11@tpu.ru, lobovaga@tpu.ru, isaevvi@tpu.ru

[2] Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, Алмата, aem.47@mail.ru

Аннотация. По данным глубокого бурения построены карты толщин резервуара пласта $Ю_{15}$. На основе палеотемпературного моделирования оценено распределение плотности генерированных нефтей в тогурских материнских отложениях. Построены карты распределения плотности первично-аккумулированных ресурсов и выполнено районирование нижнеюрского резервуара $Ю_{15}$ для постановки поисковых работ. Продемонстрирована методика прогнозирования, основанная на данных геотермии как метода разведочной геофизики.

GEOTHERMICS AS THE METHOD OF EXPLORATORY GEOPHYSICS (ON THE EXAMPLE OF THE ESTIMATE OF SEARCH PROSPECTS OF HYDROCARBON RESERVOIR OF THE SEDIMENTARY COVER AND THE BASE PLATE)

A.V. Vlasova[1], G.A. Lobova[1], E.M. Achmetov[2], V.I. Isaev[1]

[1]National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, avv11@tpu.ru, lobovaga@tpu.ru, isaevvi@tpu.ru

[2] Kazakh National Technical University, K.I. Satpaev, Almaty, aem.47@mail.ru

Abstract. According to the deep drilling the thickness map of the reservoir are constructed. Following the paleotemperature modeling authors estimated the distribution of density for generated oil of Togur deposits. The authors mapped the distribution of relative density of accumulated resources and carried out the Lower Jurassic reservoir J15 for a statement of the prospecting works. Forecasting technique based on data of a geothermic as method of exploratory geophysics has been demonstrated.

Введение. Геотермия дает важнейшую количественную информацию и в решении фундаментальных геодинамических и палеоклиматических проблем, и в региональных нефтегеологических и металлогенических исследованиях, и в прогнозно-поисковых работах.

Особая ценность данных геотермии проявляется в прогнозно-поисковых нефтегеологических исследованиях. Ценность состоит в том, что на начальном этапе исследований по геотемпературному критерию определяются очаги генерации нефти. Балансовая модель процессов нефтегазообразования [1] позволяет по геотемпературному критерию выполнить картирование очагов интенсивного образования нефтей из рассеянного органического вещества материнских отложений: с 85–95 ºС – вхождение материнских пород в главную зону нефтеобразования (ГЗН).

Как неоднократно подчеркивал М.Д. Хуторской [2 и др.], геотермия – это не только область теоретической геофизики, но и формирующийся метод разведочной геофизики. Логика формирования метода прослеживается, начиная с работ В.Н. Дахнова и Д.Г. Дъяконова, в исследованиях Ю.И. Галушкина, И.В. Головановой, Д,Ю. Демежко, А.Д. Дучкова, В.И. Исаева, А.Р. Курчикова, Р.И. Кутаса, Н.В. Лопатина, В.И. Старостенко и других ученых.

Интерпретационным методом, обеспечивающим картирование пространственно-временных параметров очагов генерации и эмиграции углеводородов (УВ), являются

палеотектонические и палеотемпературные реконструкции. Реконструкции основаны на решении обратной и прямых задач нестационарной геотермии – палеотемпературном моделировании.

В работе [3] мы показали картирование по геотемпературному критерию палеоочагов генерации тогурских нефтей, оценку и анализ распределение ресурсов генерированных и первично-аккумулированных нефтей, районирование резервуара фундамента (коренного палеозоя) Усть-Тымской мегавпадины. *Цель настоящего сообщения – продемонстрировать технологию использования данных геотермии в решении прикладной задачи нефтегазовой геофизики, в определении первоочередных районов (участков) поисков для нижнеюрского резервуара осадочного чехла Нюрольской мегавпадины.*

Метод палеотемпературного моделирования. В компьютерную реализацию метода непосредственно включены палеклимат – вековой ход температур на земной поверхности (граничное условие) и палеотемпературы определений отражательной способности витринита, как «наблюденные». Программный комплекс TeploDialog разработан на кафедре прикладной математики Новосибирского ГТУ [4, 5].

В модели процесс распространения тепла в слоистой осадочной толще описывается начально-краевой задачей для уравнения

$$\frac{\lambda}{a}\cdot\frac{\partial U}{\partial t}-\frac{\partial}{\partial Z}\left(\lambda\frac{\partial U}{\partial Z}\right)=f\,, \qquad (1)$$

где λ – теплопроводность; a – температуропроводность; f – плотность тепловыделения внутренних источников тепла; U – температура; Z – расстояние от основания осадочного разреза; t – время. С краевыми условиями

$$U\big|_{Z=\varepsilon}=U(t)\,, \qquad (2)$$

$$-\lambda\left.\frac{\partial U}{\partial Z}\right|_{Z=0}=q(t)\,, \qquad (3)$$

где $\varepsilon=\varepsilon(t)$ – верхняя граница осадочной толщи; $q(t)$ – тепловой поток из основания осадочного разреза. Как видно из формулировки задачи, палеотектонические реконструкции непосредственно сопряжены с расчетом палеотемператур.

Осадочная толща описывается мощностями стратиграфических комплексов h_i, для каждого из которых заданы теплопроводность λ_i, температуропроводность a_i, плотность тепловыделения радиоактивных источников f_i в породах осадочного разреза и время осадконакопления t_i (рис. 1). Скорость осадконакопления v_i может быть нулевой и отрицательной, что позволяет учитывать перерывы осадконакопления и денудацию. Краевое условие (2) определяется температурой поверхности осадконакоплении, т.е. определяется палеоклиматом, и задается в виде кусочно-линейной функции векового хода температур на поверхности Земли.

В случае стационарности глубинного теплового потока q, решение обратной задачи определяется из условия

$$\sum_{i=1}^{k_\tau}\Big(U\left(Z_i,t,q\right)-T_i\Big)^2\xrightarrow[q]{}\min\,, \qquad (4)$$

где T_i – «наблюденные» значения температур в k_τ точках на различных глубинах Z_i в моменты времени τ. Здесь задача решается в предположении квазипостоянства значения плотности теплового потока из основания, начиная с юрского времени. Решение обратной задачи строится с учетом того, что функция $U(Z,t,q)$, являющаяся решением прямой задачи (1) с краевыми условиями (2) и (3), в этом случае линейно зависит от q. Поэтому неизвестный параметр q определяется однозначно.

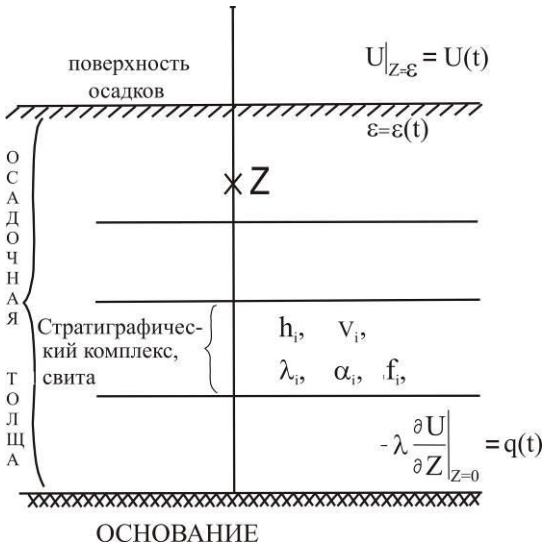


Рис. 1. Схематическое изображение осадочного разреза при палеотемпературном моделировании. Пояснения в тексте.

Схема расчета палеотемператур состоит из двух этапов. На первом этапе по распределению «наблюденных» температур T_i в скважине рассчитывается тепловой поток q через поверхность подстилающего основания, т. е. решается обратная задача геотермии. После расчета значения плотности теплового потока из основания осадочного разреза q, являющегося фундаментальным (базовым) параметром, создается и реализуется возможность (путем решения прямых задач) расчета геотемператур *U в любой точке Z геологического разреза скважины на любой момент геологического времени t*.

Применение метода палеотемпературного моделирования для картирования очагов генерации нефтей обеспечивает системный подход к изучению территории исследований. Выполняется анализ и количественная интерпретация всего доступного комплекса геолого-геофизических данных о геологическом строении, о седиментационной истории и термическом режиме всех осадочных комплексов, включая материнские отложения.

Оценка распределения плотности ресурсов первично-аккумулированных тогурских нефтей в пласте $Ю_{15}$. Песчаный пласт $Ю_{15}$ имеет широкое распространение и практически перекрывает нижележащую тогурскую свиту. С использованием данных [6] о толщинах пласта $Ю_{15}$, построена объемная модель резервуара для Нюрольской мегавпадины и обрамляющих ее положительных структур (рис. 1А).

Ранее [7], методом палеотемпературного моделирования разрезов 21-й скважины и картирования по геотемпературному критерию палеоочагов генерации нефти, выполнена оценка распределения относительной плотности генерированных тогурских нефтей Нюрольской мегавпадины и структур её обрамления – рис. 1Б.

Используя распределение значений плотности генерированных тогурских нефтей (рис. 1Б) и распределение значений толщин пласта-коллектора, методом интерполяции построена схематическая карта распределения относительной плотности ресурсов тогурских нефтей для пласта $Ю_{15}$ (рис. 2А). Здесь изменение плотности первично-аккумулированных ресурсов напрямую (с одинаковым весовым коэффициентом) зависит от аккумулирующей мощности пласта и от плотности ресурсов генерированных нефтей.

Районирование нижнеюрского резервуара пласта $Ю_{15}$. Оценка плотности ресурсов выполняется в условных единицах, что представляется корректным для последующего площадного районирования. Далее проведено районирование нижнеюрского резервуара по степени перспективности (рис. 2Б). Наибольшая плотность ресурсов приурочена к центральной части Нюрольской мегавпадины и к северной и южной части территории исследований – *зона 1*. Здесь выделено 4 района и с учетом площадного распространения проведено ранжирование по степени перспективности (табл. 1).

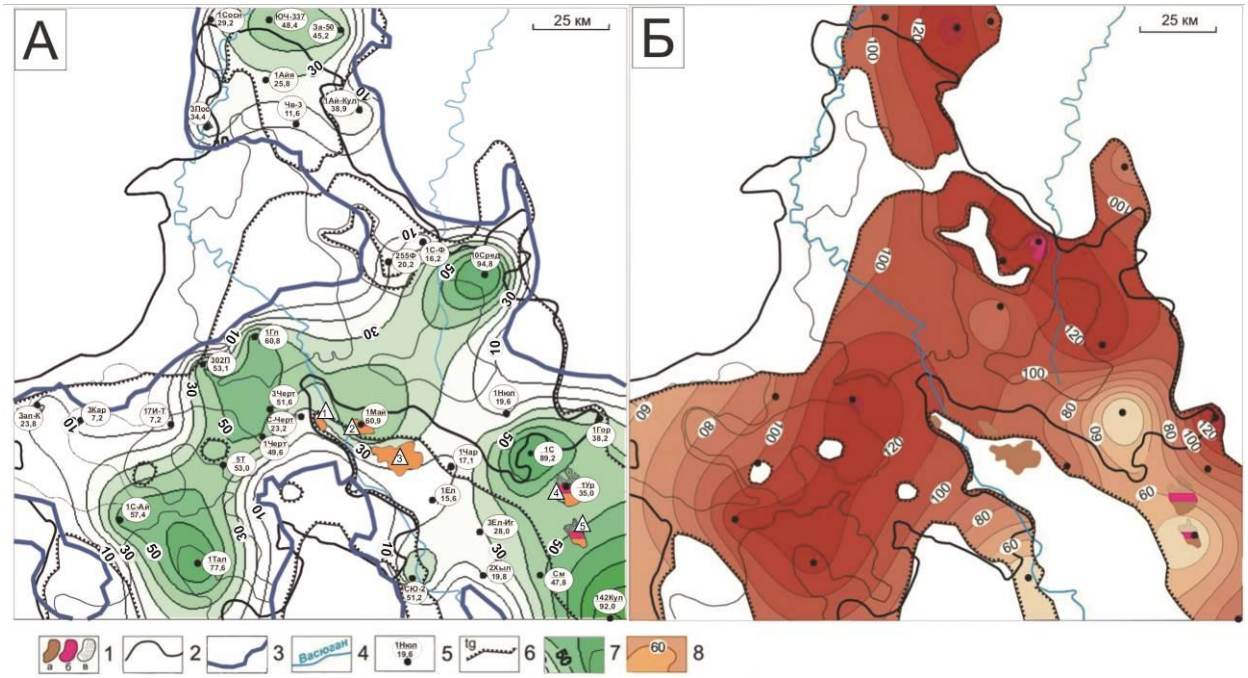


Рис. 1. Схематические карты изопахит пласта $Ю_{15}$ (А) и распределения значений плотности генерированных тогурских нефтей (Б) в пределах Нюрольской мегавпадины. 1) месторождения: *а* – нефтяное, *б* – газовое, *в* – газоконденсатное; 2) границы тектонических элементов I порядка; 3) граница распространения пласта $Ю_{15}$; 4) речная сеть; 5) скважины, использованные для построения карты изопахит: в числителе условный индекс скважины, в знаменателе – мощность пласта, м; 6) граница зоны распространения тогурской свиты; 7) изопахиты пласта $Ю_{15}$; 8) изолинии значений плотности генерированных тогурских нефтей, усл.ед. Месторождения: Среднемайское (1), Майское (2), Южно-Майское (3), Урманское (4), Арчинское (5) с залежами углеводородов в пласте $Ю_{15}$

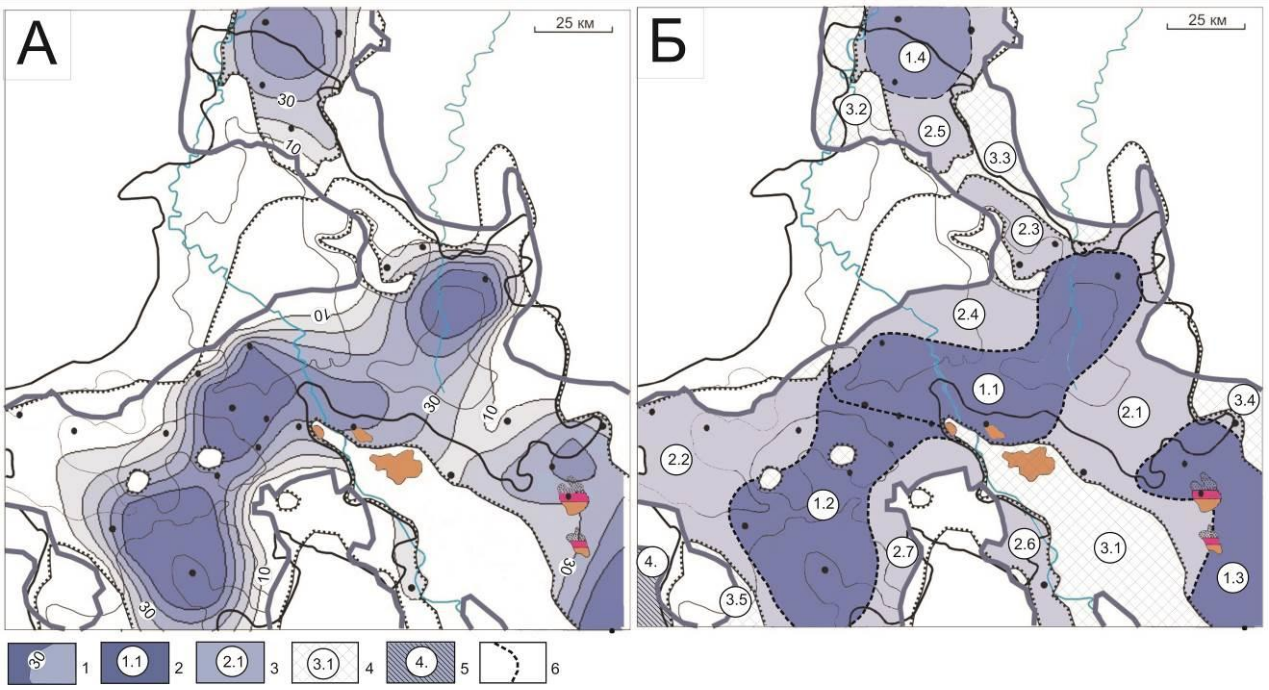


Рис. 2. Схематические карты распределения плотности первично-аккумулированных ресурсов тогурских нефтей в пласте $Ю_{15}$ (А) и районирования пласта $Ю_{15}$ Нюрольской мегавпадины (Б). 1) изолинии значений плотности ресурсов, условные единицы; 2)–5) – зоны с 1 по 4 (номер ранжирования; диапазон значений плотности ресурсов, усл. ед.): 1. – больше 30, 2. – меньше 30, 3. – зоны выклинивания тогурских отложений в пределах распространения пласта; 4. – зона отсутствия оценки плотности аккумулированных ресурсов; 6) границы районов. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 1

Таблица 1 – Районирование резервуара пласта $Ю_{15}$ Нюрольской мегавпадины по плотности первично-аккумулированных нефтей (* – ранжирование по степени перспективности)

Район*	Тектоническая приуроченность	Ресурсы, усл. ед.	Площадь, тыс. км^2
1.1	Западная часть Тамрадской и южный борт Кулан-Игайской впадин и зона их сочленения	>30	2,7
1.2	Юго-восточные склоны Игольско-Талового поднятия, северный борт Тамянского и южный борт Осевого прогибов и зона их сочленения	>30	2,2
1.3	Чузикско-Чижапская мезоседловина	>30	1,2
1.4	Зона северного вреза Нюрольской мегавпадины	>30	0,7
2.1	Зона сочленения юго-восточного борта Нюрольской мегавпадины и Чузикско-Чижапской мезоседловины	<30	1,0
2.2	Северный склон Игольско-Талового поднятия, Осевой прогиб и зона их сочленения	<30	0,9
2.3	Северо-восточный склон Фестивального вала и северо-восточный борт Нюрольской мегавпадины	<30	0,7
2.4	Центральная часть Кулан-Игайской впадины и зона сочленения с Фестивальным валом	<30	0,6
2.5	Южная часть северного вреза Нюрольской мегавпадины	<30	0,4
2.6	Зона сочленения южного борта Нюрольской мегавпадины и Северо-Межовской мегамоноклинали	<30	0,3
2.7	Восточный борт Тамянского прогиба	<30	0,3

Заключение. В Казахском НТУ им. К.И. Сатпаева для магистрантов геофизиков и геологов-нефтяников читается 74-часовой спецкурс «Нефтегеологическая интерпретация геолого-геофизических данных». Основы курса включают понятия главной зоны нефтеобразования и технологию картирования очагов генерации углеводородов методом палеотемпературного моделирования. В качестве лекционного и практического материала используются данные нефтегеологического прогнозирования по Усть-Тымской и Нюрольской мегавпадинам.

Литература

1. Бурштейн Л.М., Жидкова Л.В., Конторович А.Э., Меленевский В.Н. Модель катагенеза органического вещества (на примере баженовской свиты) // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
2. Хуторской М.Д. Введение в геотермию: курс лекций. – М: Изд-во РУДН, 1996. –156 с.
3. Лобова Г.А., Исагалиева А.К., Ахметов Е.М., Исаев В.И. Геотермия как метод разведочной геофизики (на примере оценки ресурсов углеводородов доюрского основания Западной Сибири) // Известия НАН Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. – 2015. – № 2. – С. 84-94.
4. Исаев В. И., Гуленок Р. Ю., Веселов О. В., Бычков А. В., Соловейчик Ю. Г. Компьютерная технология комплексной оценки нефтегазового потенциала осадочных бассейнов // Геология нефти и газа. – 2002. – № 6. – С. 48–54.
5. Исаев В.И., Лобова Г.А., Рояк М.Э., Фомин А.Н. Нефтегазоносность центральной части Югорского свода // Геофизический журнал. – 2009. – Т.31. – №2. – С. 15–46.
6. Лифанов В.А. Особенности геологического строения и перспективы нефтегазоносности нижнеюрских базальных горизонтов юго-востока Западной Сибири // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО. Том 1. - Ханты-Мансийск: «ИздатНаукСервис», 2012. – С. 252–257.
7. Лобова Г.А. Нефтегазоносность нижнеюрского резервуара Нюрольской мегавпадины (по геотемпературному критерию) // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Седьмые научные чтения Ю.П. Булашевича. Материалы конференции. – Екатеринбург: УрО РАН, 2013. – С. 179-181.

УДК [550.83:550.814:551.2:552.3:553.4](571.61/62)

СВЯЗЬ РЕГИОНАЛЬНЫХ АНОМАЛИЙ ОТНОШЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (ЕРЭ) С ГЛУБИННЫМ СТРОЕНИЕМ

Т.В. Володькова*, volodkova@itig.as.khb.ru, tat-volodkova@yandex.ru*
Институт тектоники и геофизики им. Ю.А.Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация. Региональные аномалии естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) имеют диаметр 5-50 км и площадь десятки-сотни км^2. Обычно они характеризуют магматические комплексы либо гидротермально-метасоматические системы (ГМС), связанные с рудными полями, рудными узлами. Методы содержаний и отношений ЕРЭ признаны геохимическими и глубинными, но оценка глубинности проведена только качественно. Более точную оценку дает интерпретация региональных аномалий отношений ЕРЭ совместно с результатами глубинного количественного моделирования (сейсмогравитационнного, МТЗ).

RELATIONSHIP OF THE REGIONAL ANOMALIES OF NATURAL RADIOACTIVE ELEMENTS (NRE) WITH DEEP STRUCTURE

T.V. Volod'kova*, volodkova@itig.as.khb.ru, tat-volodkova@yandex.ru*
Yu. A Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. The regional anomalies of natural radioactive elements (NRE) are of 5-50 km diameter and encompass an area of tens to hundreds of km^2. They commonly characterize magmatic complexes or hydrothermally-metasomatic systems (HMS), related to ore fields and ore junctions. The methods of NRE contents and ratios are considered to be geochemical and deep, but only the qualitative estimation of the depth has been made. A more precise estimation is obtained by the interpretation of the regional NRE ratio anomalies jointly with the results of the deep quantitative (seismogravitational, MTS) modeling.

По данным аэрогаммаспектрометрии измеряются естественные радиоактивные элементы (ЕРЭ) и строятся карты их содержаний и отношений (U, TH, K, U/Th, K/Th,U/K). С физической точки зрения, эти методы приповерхностные, но геохимически могут быть связаны со значительными глубинами. Косвенно значительная глубинность методов отношений ЕРЭ хорошо доказана их четкой связью с объемными гидротермально-метасоматическими системами и специализированными магматическими комплексами. Предпочтительно использовать для анализа значения отношений ЕРЭ, они меньше зависят от различных погрешностей и соизмеримы с данными наземной съемки; при этом следует учесть некоторые особенности.

Любое измеренное значение ЕРЭ в аэрогаммаспектрометрии - среднестатистическая величина, в отличие от наземных аналогов она автоматически определяется с некоторым радиусом осреднения. Радиус осреднения зависит от технических характеристик прибора, высоты и скорости полета, обычно составляет не менее 50-75 м. Таким образом, аэрогаммаспектрометрические поля достоверно фиксируют аномальный ареал диаметром не менее 130-150 м, что подтверждено автором статистически, с практическим использованием результатов съемки масштаба 1:25000-1:50000 и аппаратуры СКАТ-77. При такой съемке заведомо сглаживаются резкие микровариации рудных и радиоактивных элементов в малых объемах вещества, которые особо типичны для рудных зон и участков, создавая интенсивную «пилу» [1]. Это «естественное» сглаживание флюктуаций упрощает картирование региональных и локальных радиохимических ореолов, дает возможность получить карты содержаний и отношений ЕРЭ лучшего качества, сравнительно с наземной геохимией и спектрометрией соответствующего масштаба. Такое «сглаживание» оптимально; тем не менее, современные аэропартии, работающие с самой совершенной аппаратурой, часто применяют сглаживание с гораздо большим окном (радиусом), что

придает картам содержаний ЕРЭ более «красивый» гладкий вид. По мнению автора, при интенсивном сглаживании теряется значительное количество полезной информации по гидротермально-метасоматическим комплексам. Попробуем обосновать это.

Региональные и локальные аномалии отношений ЕРЭ обычно характеризуют гидротермально-метасоматически измененные породы (ГМП), создающие объемные гидротермально-метасоматические системы (ГМС). Региональные геохимические ареалы имеют площадь S= n*10-n*100 км^2 и описывают ГМП, связанные с рудными полями, узлами. Локальные ареалы с площадью S= n *10^{-1} – n км^2 соответствуют месторождениям, рудным телам [1]. Из геохимии известно: для месторождений и рудных полей золота, других металлов типичны концентрически-зональные локальные и региональные ареалы или гидротермально-метасоматические системы (ГМС). Обычно такие системы состоят из 2-3 основных зон близкой горизонтальной мощности, их общие размеры указаны выше. Таким образом, горизонтальная мощность отдельных зон метасоматитов различного типа в локальных ареалах, связанных с месторождениями, составляет не менее 100-300 м. Автором показано: в большинстве случаев, эти зоны могут быть закартированы с использованием значений отношений ЕРЭ и данных съемки масштаба 1:50000 [2]. Абсолютно однозначно будут закартированы рудные поля и узлы, с которыми связаны концентрически- зональные ГСМ от 10 до 100 км в диаметре; каждая зона в таких концентрических ареалах будет иметь мощность порядка 5-20 км. Примерные горизонтальные мощности зон метасоматоза ставят ограничения при выборе окон для сглаживающих трансформаций аэрогаммаспектрометрических карт. С использованием карт отношений ЕРЭ и геолого-гехимических данных, были закартированы примеры таких систем, подтверждающие сказанное (рис.1).

Среди ГМС по геологическим данным выделяются вулканогенные, плутоногенные и тектоногенные, их максимальная глубина по вертикали составляет от 2 до 7 км; связаны они, как правило, с магматическими источниками, находящимися в непосредственной близи или на некотором удалении [1]. С такими ГМС полностью увязываются модели, построенные по данным аэрогаммаспектрометрии [2]. Подтверждено, что глубинность методов картирования метасоматитов по значениям отношений ЕРЭ реально достигает 7-10 км (осадочно-метаморфический, гранитный слой земной коры).

Известно, что часть магматических комплексов, которые прекрасно картируются на картах отношений ЕРЭ, имеют не только коровую, но и мантийную природу, являются производными плюмового магматизма [3]. Эти выводы хорошо увязываются с данными качественной интерпретации с использованием глубинных геофизических методов – магнитометрии, гравиметрии, электроразведки. Эти факты подтверждают возможность использования значений содержаний и отношений ЕРЭ для более глубинных построений. Тем не менее, такие оценки ранее проводились автором качественно и достаточно формально. Чаще всего, доказательством «мантийной» природы магматического комплекса служили рассчитанные среднестатические характеристики отношений ЕРЭ, по величине сопоставимые с неким «эталоном». Эталоном служили среднестатистические характеристики отношений ЕРЭ, рассчитанные для комплексов, признанных международным ученым сообществом как «плюмовые». «обогащенные мантийные резервуары» и прочее. Эти фактические данные разрознены, их явно недостаточно, кроме того, для доказательства «мантийного» происхождения магматизма используются только три характеристики U/Th, K/Th, U/K. Совершенно ясно: такие оценки являются достаточно грубыми; дополнительного уточнения характеристик требуют сами «эталоны». Только три параметра отношений ЕРЭ, при возможном наличии большого количества «помех» также далеко не всегда гарантируют необходимую устойчивость решения. Такое положение можно поправить, дополнительно используя другие петрофизические и геохимические характеристики. Широкий комплекс методов резко повысит достоверность всех построений.

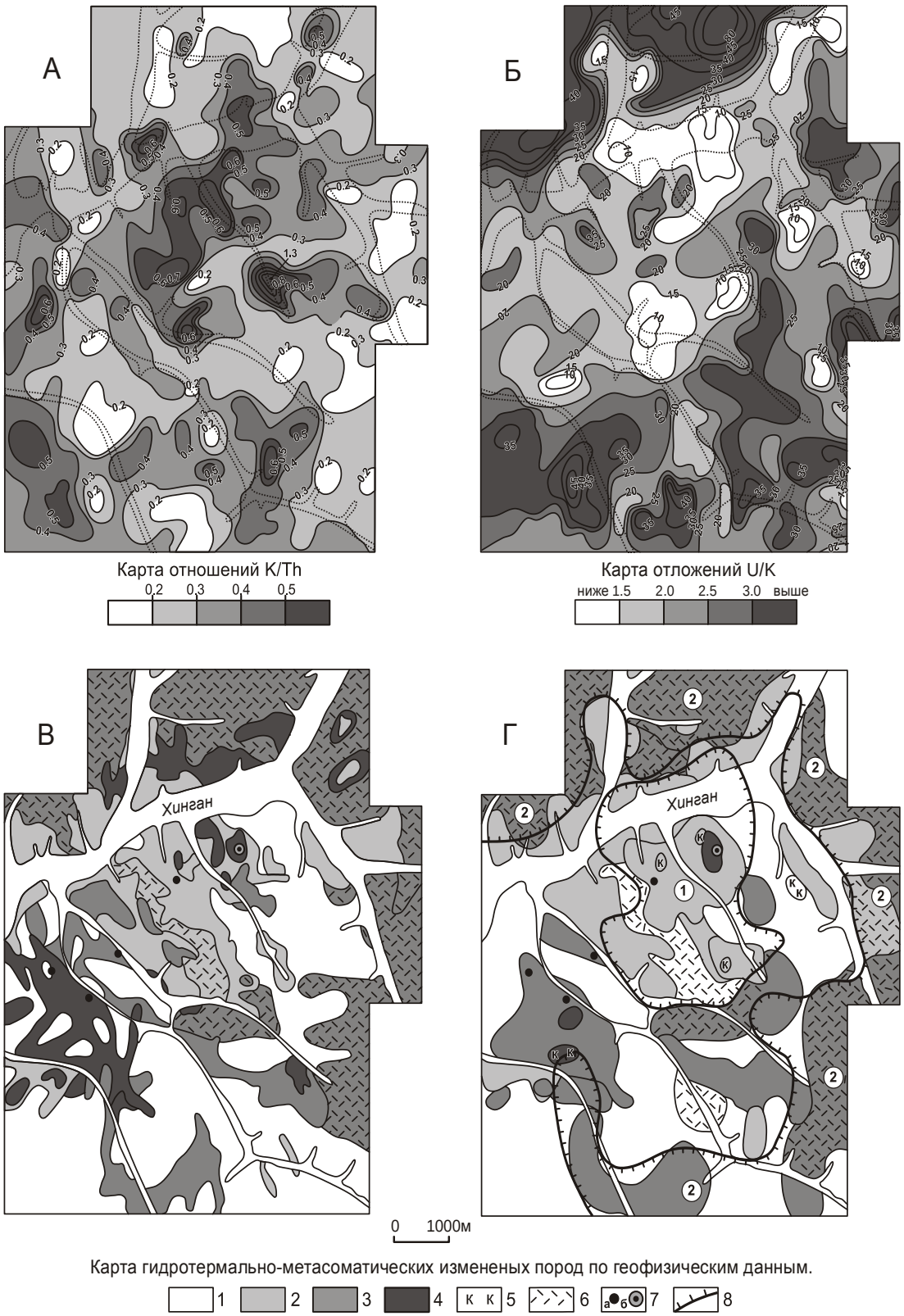


Рис.1. Гидротермально-местасоматическая зональность Хинганского рудного поля и ее отражение на карте отношений ЕРЭ.

Карты отношений ЕРЭ: А – K/Th отношений; U/K отношений. Карты гидротермально-метасоматически измененных пород Хинганского рудного поля: С – по геолого-геохимическим данным (Шестернева, 1986); Д - по аэрогеофизическим данным.

Гидротермально-метасоматические изменения (С, Д): 1 – слабые изменения; 2 - кварц-эпидотовая фация, 3 – кварц-серицитовые изменения; 4 – кварц-гидрослюдистая фация; 5 – адуляризация; 6 - автометасоматиты; 7 – проявления (а) и месторождение (б) олова;8 – зоны низкотемпературных метасоматитов, включая: 1 – пропилиты, 2 – кварц-гидрослюдистую фацию.

Для доказательства глубинной природы региональных аномалий отношений ЕРЭ, кроме петрофизических, могут использоваться глубинные геофизические методы. С этой целью в древних архейско-протерозойских комплексах (Алданский щит, Буреинский массив) выделено несколько профилей масштаба 1:200000 – 1:500000, по которым использовались результаты глубинных геофизических съемок (магнитное, гравитационное, тепловое поле, сейсмометрия, МТЗ) и результаты их 2D-3D моделирования. По этим же профилям, на основе аэрогаммаспектрометрических съемок масштаба 1:50000 – 1:200000, построены графики отношений ЕРЭ. Все эти данные увязаны, приведены к одному масштабу и проинтерпретированы совместно. Главный недостаток таких построений – трудно свести к одному масштабу данные аэрогаммаспектрометрии (как правило, очень детальные, крупномасштабные) и глубинных геофизических методов, масштаб которых может быть мельче на порядок. Аэромагнитометрия всегда сопровождалась аэрогаммаспектрометрией. Результаты этих методов легко сопоставимы на профиле Амур – Бира (рис.2).

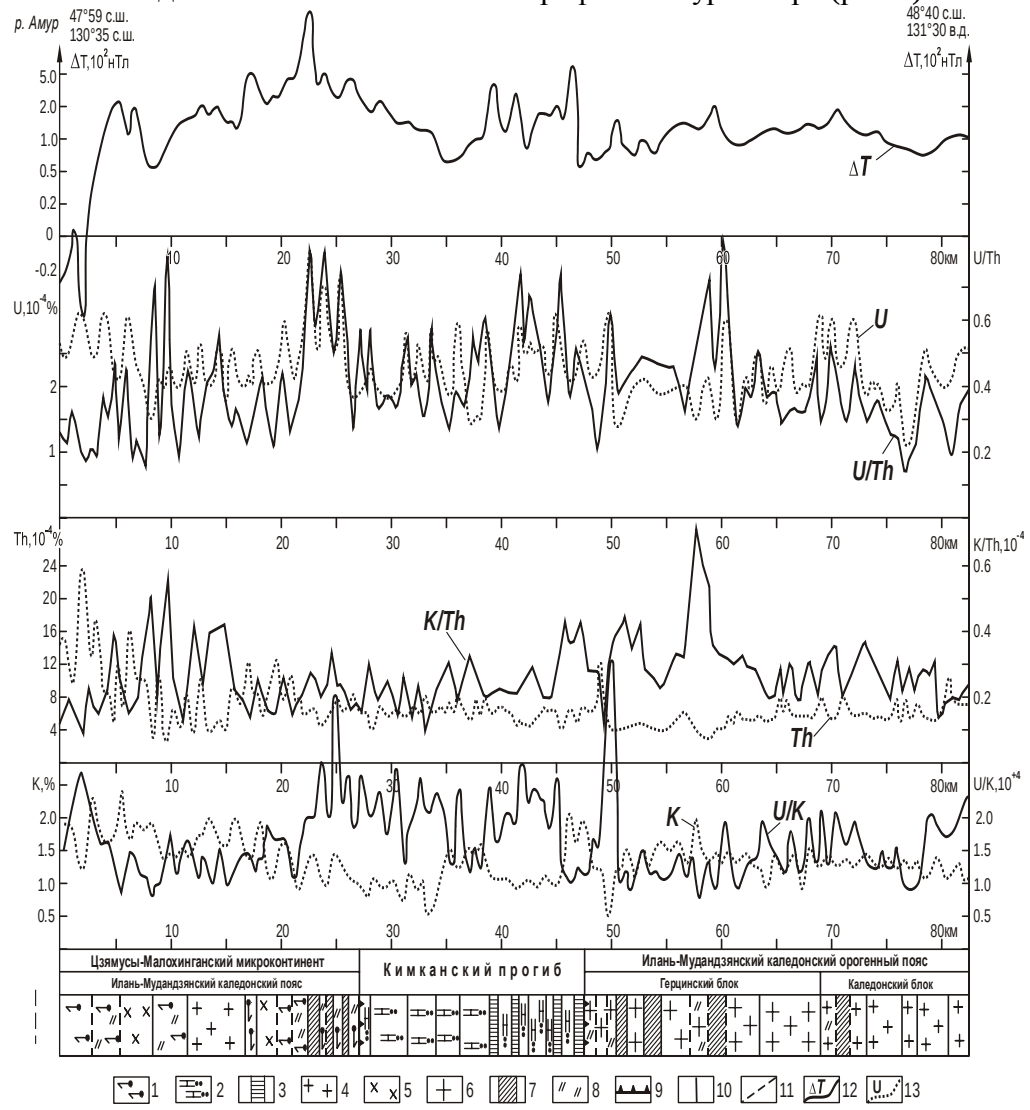


Рис.2 Геолого-геофизические характеристики профиля Амур – Бира, составленном Т.В. Володьковой с использованием материалов Л.П. Карсакова и др. [4].

Метаморфогенно-осадочные-комплексы: 1 – верхнеархейские кварцито-кондалитовые; 2 – каледонские терригенно-карбонатные; 3 – каледонские рудоносные известняки, доломиты (железо-маргацевые руды). Магматические комплексы. Бирско-биробиджанский МК: 4-гранитоиды, лейкограниты; 5 – диориты, гранодиориты. Тырминский МК: 6 – гранитоиды; 7 – дайки, штоки; 8 – метасоматиты. Границы раздела: 9 – глубинные разломы (границы блоков); 10 – прочие разломы; 11 – стратиграфические контакты. Графики полей: 12 – магнитное поле, отношения ЕРЭ; 13 – содержания ЕРЭ.

Все особенности структуры и состава комплексов, выделенных на графиках отношений ЕРЭ, четко коррелируются с особенностями магнитного поля и его градиента (рис.2). Большинство аномалий отношений ЕРЭ связаны с зонами разломов. Все эти факты являются хорошей иллюстрацией большой глубинности метода отношений ЕРЭ, связи его характеристик с особенностями строения и состава земной коры. Принято, что в земной коре, особенно в гранитном слое, содержания ЕРЭ максимальны. Магнитное поле глубинное, но обычно характеризует аномалии коровой природы, так как температура даже в верхах мантии (в литосфере) выше точки Кюри. Для оценки обогащенных мантийных резервуаров, которые связываются в мантии с деятельностью плюмов, более всего подходят результаты сейсмогравитационного моделирования и модели, построенные на основе метода МТЗ. Такие модели были построены по профилю Джалинда – Томмот [2]; они сопровождались графиками отношений ЕРЭ масштаба 1:500000 -1:200000. Совместный анализ данных четко показал связь региональных аномалий отношений ЕРЭ с разломами мантийного заложения. Региональные аномалии отношений ЕРЭ, как правило, связаны с приразломными структурами горизонтальной мощностью 10-20 км, что соответствует объемной мощности (зоне влияния) крупных разломов. Можно предположить: в большинстве случаев на профиле Джалинда – Томмот региональные аномалии отношений ЕРЭ характеризуют тектоногенные ГМС, находящиеся под сильным влиянием мантийного метасоматоза плюмовой природы. Эти аномалии отношений ЕРЭ пространственно очень четко коррелируются с распределением вещества пониженной вязкости и сопротивления на глубине на основе моделирования по методу МТЗ. Они также хорошо коррелируются с поведением глубинных границ, в основном, в нижней части литосферы, на основе моделей сейсмогравитационнного моделирования. Все эти факты доказывают определяющую роль мантийных процессов и мантийного (плюмового) метасоматоза на образование и распределение региональных аномалийотношений ЕРЭ.

Литература

1. Плющев Е.В., Шатов В.В. и др. Металлогения гидротермально-метасоматических образований. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. 560 с. Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. Том 354.
2. Глубинное строение и металлогения Восточной Азии / отв. ред. А.Н. Диденко, Ю.Ф. Малышев, Б.Г. Саксин. Владивосток: Дальнаука, 2010. 332 с.
3. Володькова Т.В. Тренды отношений радиоактивных элементов и природа магматогенных месторождений Приамурья // Литосфера. 2012. №2. С. 67-89.
4. Tectonic map of the Central Asian-Pacific belts Junction Area. S. 1:1500000 / Compiled bi Karsakov L. P., Zhao Chunjing et al. RAS FEB Yu. A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics; China Geological Survey; Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources. Khabarovsk-Shenyang, 2001. 6 sh.

УДК 550.36(571.6)

ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ СЕВЕРО–ВОСТОКА ЕВРАЗИИ

П.Ю. Горнов, *gornov@itig.as.khb.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

В работе рассмотрены литосферные плиты северо-востока Евразии, определены их границы и типы взаимодействий, проведен анализ тепловых полей, проанализированы геотермические параметры как самих плит, так и их зон взаимодействий.

THE THERMAL FIELD OF THE LITHOSPHERIC PLATES OF NORTHEASTERN EURASIA

P.Yu. Gornov

Federal Research Budgetary Institution Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences; Khabarovsk, Russia

The lithospheric plates of Northeastern Eurasia are considered in the paper body, types of their interaction are defined and boundaries. The analysis of thermal fields is performed and geothermal parameters of the plates as well as their interaction zones are analyzed.

Из всех геофизических характеристик наиболее полную информацию об энергетическом режиме Земли и отдельных тектонических структурах даёт тепловой поток (ТП). Он позволяет выявлять природу глубинного тепла, термическую эволюцию Земли, направление и интенсивность геологических процессов, сопровождающихся поглощением и генерацией энергии.

В отличие от методов картирования других геофизических полей (гравитационного, магнитного, электрического), где существует возможность планировать проведение измерений в различных геолого–тектонических структурах, измерения ТП на материке сдерживается ограниченностью площадей разведочно–поискового бурения и наличием скважин, проходимых для термозонда, методическими и техническими вопросами определения ТП в «мелких» скважинах, малочисленностью организаций, занимающихся геотермическими измерениями. На акваториях проводить геотермические исследования методически проще. Тепловой поток может быть измерен практически везде, где есть донные осадки, там нет ярко выраженной корреляции между пунктом измерения ТП и поиско–разведочными работами. К областям взаимодействия литосферных плит всегда было повышенное внимание исследователей. Поэтому плотность измерений в таких районах существенно выше, чем на других участках дна акваторий (зона субдукции Тихоокеанской плиты под Евроазиатский континент). Также развиты полигонные исследования ТП на акваториях, которые дают более надёжную информацию, чем одиночные измерения, что позволяет, оценить вклад различных типов теплопереноса в океанической коре, более точно рассчитать глубинные температуры в литосфере и фоновый ТП (Берингово, Охотское, Японское море, Татарский пролив).

Приведённые в работе данные измеренных значений ТП характеризует геотермический режим практически всех структурно–формационных и возрастных зон литосферы региона..

В основу всех геотермических расчётах, моделей, взяты значения ТП, приведённые на карте использованного фактического материала (рис. 1), составленной по материалам Советских, Российских, Китайских, Корейских, Японских исследователей 1960–2014 г. На карте показано порядка 700 измеренных значений ТП на суше и свыше 1500 измерений ТП на акваториях [1; 9].

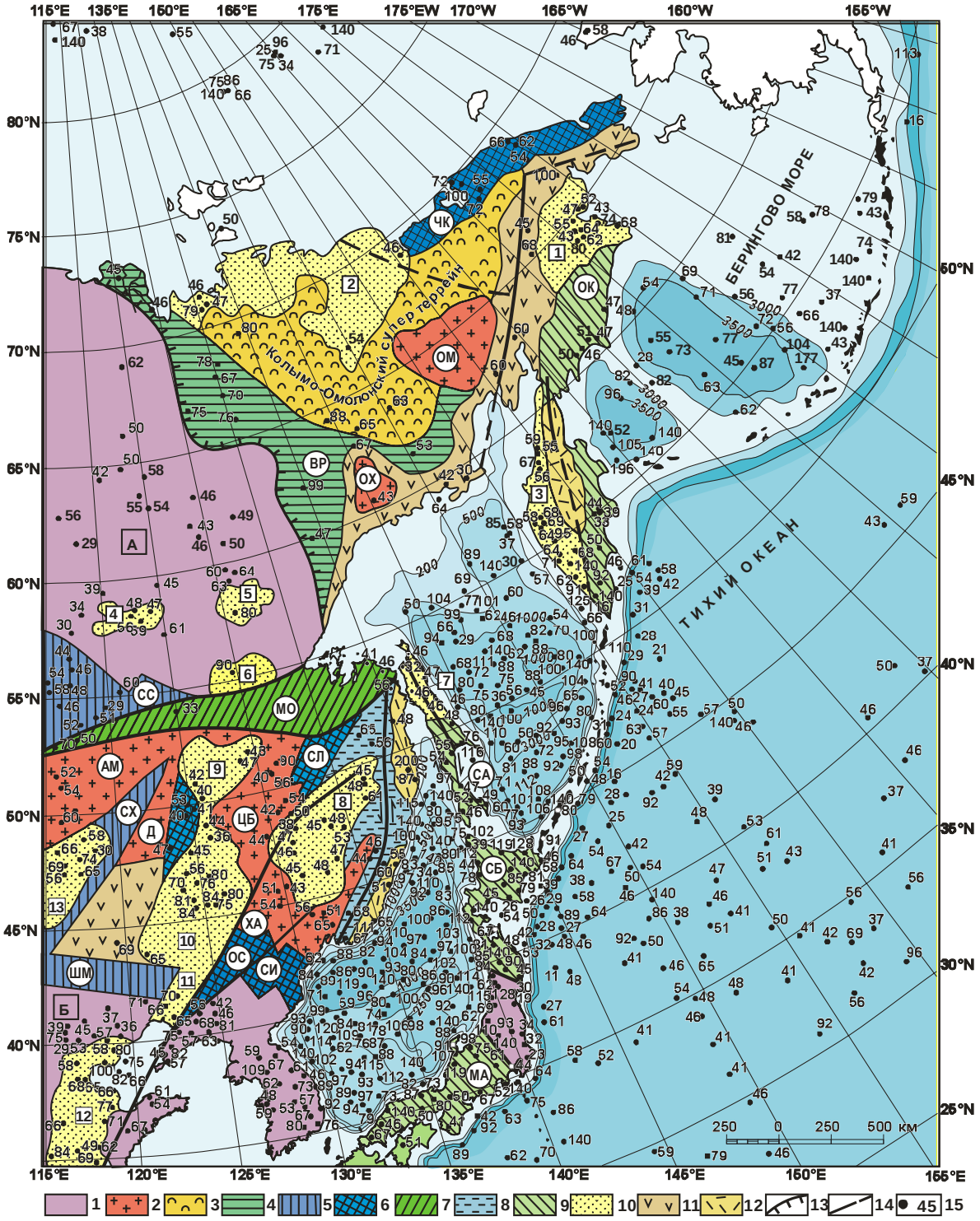


Рис. 1 Карта использованного фактического материала

Тектоническое районирование [2; 5; : 7; 10].

1. Древние платформы: А–Сибирская, Б–Северо–Китайская; 2–микроконтиненты с докембрийским фундаментом (буквы в кружках): ОМ–Омолонский, ОХ–Охотский, АМ–Аргуно–Мамынский, Д–Дягдачи, ЦБ–Цзямусы–Буреинский, ХА–Ханкайский: 3–Колымо–Омолонский супертеррейн; 4–Верхояно–Колымская палеозойско–мезозойская складчатая система; 5–9 –орогенные пояса (буквы в кружках): 5– каледонские (СС–Селенга–Становой, СХ–Северо–Хинганский, ШМ–Шара–Мурэнский); 6–герцинские (ЧК–Чукотский, СЛ–Сулукский, ЛС–Луньцзян–Селемджинский, ОС–Ондоро–Сумский, СИ–Силамулунь–Иэнбэнский); 7–позднегерцинский–индосинийский (МО–Монголо–Охотский); 8–киммерийский–(Сихотэ–Алинский); 9–позднекиммерийские–альпийские (ОК–Олюторо–Камчатский, СБ–Санбагава, МА–Мино–Тамбо–Ашио); 10–мезозойско–кайнозоские осадочные бассейны (цифры в квадратах): 1–Анадырский, 2–Ленско–Зыряновский, 3–Западно–Камчатский, 4–Чульман-ский, 5–Токинский, 6–Верхне–Зейский, 7–Северо–Сахалинский, 8–Средне–Амурский, 9–Амуро–Зейский, 10–Сунляо, 11–Ляохэ, 12–Северо–Китайский, 13–Хайлар; 11–12–вулканические пояса: 11–мезозоские, 12–позднемезозойские–кайнозойские; 13–надвиги; 14–сдвиги; 15–измеренные значения теплового потока (мВт/м^2) [1; 9].

Изучаемый регион находится в зоне взаимодействия трех крупнейших литосферных плит Земли: Евразийской, Северо–Американской, Тихоокеанской и плит меньшего порядка – Северо–Китйской, Охотоморской, Амурской, Беринговоморской. Взаимодействие этих тектонических структур, по всей вероятности, предопределяет разнообразную геодинамическую обстановку и большую неоднородность измеренных значений ТП.

Литосферные плиты, блоки отделены друг от друга разломами, разрывами (швами), как правило, по осевым линиям сейсмических поясов Земли. Главным индикатором границ плит является сейсмичность. Сейсмические пояса очерчивают главные границы литосферных плит. Границам раздвижения свойственны мелкофокусные землетрясения, в очагах которых регистрируется растяжения поперёк простирания этих зон. Границы сближения плит отмечены поясами глубокофокусной сейсмичности с преобладанием компоненты сжатия по падению этих зон.

Значительная часть северо-востока Евразии подвержена воздействию сильных землетрясений, тяготеющих к неотектоническим структурам, которые формирует, в основном, Арктико–Азиатский и Байкало–Становой сейсмические пояса и субдукционная зона взаимодействия Тихоокеанской плиты с Евроазиатской и Северо–Американской. Пояса высокой, глубокофокусной сейсмичности прослеживаются вдоль островных дуг (Алеутской, Курило–Камчатской, Японской, Идзу–Бонинской). Арктико–Азиатский сейсмический пояс пересекает Северный ледовитый океан, северо-восток Азии и разграничивает Северо–Американскую плиту от Евразийской и Охотоморской плит. Высокая сейсмичность зарегистрирована в переходной зоне, расположенной между структурами растяжения срединно-океанического хр. Гаккеля и структурами сжатия хр. Черского. Для переходной зоны характерно расширение поля сейсмичности до 600 км, к которым приурочены очаги землетрясений с магнитудой 6.0–7.0 [4]. Очаги местных землетрясений в виде субмеридиональной полосы протягиваются с севера на юго-юго-восток, соединяя проявление сейсмичности в море Лаптевых и системы хр. Черского [6;8].

Северо–западная часть области взаимодействия Евразийской и Амурской плит [3] проводят по Байкальскому рифту, а далее на восток по Байкало–Становому сейсмическому поясу. Обстановка растяжения в Байкальском рифте сменяется далее обстановкой сжатия и сдвиго-сжатия, при этом в западной части распространенны левые сдвиги, а в восточной– правые. Характер распределения эпицентров землетрясений изменяется от полосового до рассеянного, к востоку рассеянность эпицентров усиливается [4].

Одним из вариантов проведения границы между Амурской и Северо–Китайской литосферными плитами является северный край Северо–Китайской платформы, характеризующаяся развитием различных типов взаимодействия плит: конвергентной, дивергентной, трансформной [10]. Граница отделяет слабосейсмичную Амурскую плиту от высоко сейсмичной Северо–Китайской платформы, смещаясь параллельно ей внутрь платформы, что может свидетельствовать о надвигововых процессах на северной границе платформы с её складчатым обрамлением.

Высокая сейсмичность зон взаимодействия литосферных плит характеризуется также повышенными и высокими значениями ТП, которые в, основном, приурочены к областям растяжения со сдвигом 60-120 мВт/м^2 (хр. Гаккеля, Байкальский рифт, Татарский пролив). Несколько ниже значения ТП в областях сжатия, сдвиго-сжатия 60- 80 мВт/м^2 (юго-восточная часть Байкало-Станового сейсмического пояса, области взаимодействия Амурской плиты с Северо-Китайской плитой).

Тектонические структуры материковой части региона обладают не высокими значениями геотермических параметров. Средние значения величин ТП тектонических структур имеют небольшой разброс – 50–70 мВт/м^2, наибольшие величины характерны для вулканогенных поясов 90–200 мВт/м^2 и осадочных, в основном, нефтегазоносных бассейнов региона – 80–90 мВт/м^2, а наименьшие для докембрийских блоков, массивов и орогенных поясов – 50–60 мВт/м^2 (таблица 1).

Сводная таблица теплового потока структурных элементов региона Таблица. 1.

Структурный элемент	Количество определений	Тепловой поток, мВт/м^2		
		минимальный	средний	максимальный
Докембрийские блоки и массивы	170	20	52	60
Орогенные пояса	140	45	60	69
Вулканогенные пояса	120	40	90	200
Осадочные впадины	280	45	75	90

Тепловой поток докембрийских блоков и массивов в условиях отсутствия тектоно-магматической активизации, большой мощностью пород с высокой теплопроводностью, длительным поверхностным охлаждением определяется, в основном, радиогенной теплогенерацией горных пород этих образований.

Тепловой поток складчатых структур формировался под влияние эрозии, наличием структурно–теплофизических неоднородностей, палеоклиматическими вариациями температуры, динамики подземных вод, присутствием циклов позднейшей тектоно–магматической активизации и механизма преобразования океанической коры в континентальную. Области мезозойско–кайнозойской тектоно–магматической активизации характеризуются современным проявлением вулканизма, многочисленными гидротермальными проявлениями, с резко нестационарным режимом подкорового разогрева и с значительной дифференциацией ТП.

Большинство осадочных впадин региона относятся к мезозойско-кайнозойским рифтогенным бассейнам континентальных окраин, образование которых, возможно, связано с субдукцией Тихоокеанской литосферной плиты под восточную окраину Евразийского континента. При образовании рифтов происходит перераспределение источников тепла и нарушается условия теплопереноса. В результате изменяется распределение температур и ТП. На проницаемых участках земной коры тепловая энергия интенсивно выносится с продуктами дифференциации мантии, что вызывает общее повышение температур и ТП особенно в зонах гидротермальной активности и вулканизма

Тепловой поток окраинных морей высокий – 80–100 мВт/м² и имеет общую тенденцию – во впадинах, котловинах он значительно выше чем на поднятиях. Среднее значения ТП Японского моря составляет 93 мВт/м^2. Вся акватория покрыта аномалиями, в крупных положительных аномалиях ТП достигает 100–150 мВт/м^2 в их центральных частях, южной части Татарского пролива ТП превышает 100 мВт/м^2. Среднее значение ТП Охотского моря в центральной и южной частях составляет 85 мВт/м^2. Увеличены значения ТП во впадинах Дерюгина, ТИНРО, Курильской котловине 87 и более 100 мВт/м^2. Центрально–Охотское поднятие характеризуется как зона относительно пониженногоТП 60 мВт/м^2. В районах Курило–Камчатской и Алеутской островных дуг в окрестностях глубоководных желобов ТП понижен относительно среднеокеанического и составляет 30–40 мВт/м^2, в районах вулканических дуг ТП повышается до 80–120 мВт/м^2 , в зонах задугового спрединга (впадины Хонсю, Курильская) ТП достигает аномально высоких значений 140–180 мВт/м^2.

Заключение. Проведён анализ геодинамической обстановки и теплового поля региона. Проходящие по континенту границы представляют собой “веер’ границ, занимающий территорию до первых сотен километров. Рассмотрено положение границы Евразийской и Северо–Американской литосферных плит на северо-востоке России. Она простирается с севера на юго-восток России от побережья моря Лаптевых вдоль хребта Черского. Согласно сейсмологическим и GPS измерениям, эта граница выделяется обстановкой современного сжатия (смещения до 5 мм в год). Севернее берега Охотского моря в южной части хребта Черского широким поясом проходит граница Северо-Американской и Охотоморской плит,

смещения здесь носят преимущественно сдвиговый характер, до 3-4 мм в год. Землетрясения, зарегистрированные на границах литосферных плит, в основном, расположены в пределах земной коры, мощность которой достигает 40 км. Максимальная зарегистрированная магнитуда землетрясений в этих районах достигает 7.0.

Тепловой поток областей взаимодействия литосферных плит заметно превышает фоновый окружающих территорий. Таким образом области взаимодействия литосферных плит северо-востока Евразии характеризуются высокой сейсмичностью, утонением земной коры и повышенными значениями ТП. На границе взаимодействия Северо-Американской и Евразийской плит ТП составляет 60-70 мВт/м^2. Как температуры на поверхности Мохоровичича (М), так и глубины до кровли астеносферы в первую очередь зависят от величин ТП. Значения ТП и мощности литосферы связаны обратным соотношением. Зонами повышенных и высоких значений ТП характеризуются области с сокращенной мощностью литосферы и высокими температурами на поверхности М. Это может свидетельствовать о тепловой активности верхней мантии, термической деструкции земной коры и, отчасти, о её теплоизолирующем эффекте. Мантийная составляющая ТП окраинных морей составляет 80–90% от общей величины, тогда как для областей континентального обрамления мантийный ТП не превышает 30–40%. Локальные аномалии ТП, температуры, мощности литосферы в первые десятки километров в основном обусловлены нерегулярностью форм рельефа, контрастной теплопроводностью нижних слоёв осадочного чехла относительно вмещающей толщи кристаллического фундамента, наличием источников дополнительного тепла. В этом случае амплитуда ТП в два–три раза превышает среднее для области значения, а источники этих аномалий располагаются на глубинах 10–20 км или менее. Температуры в источниках дополнительного тепла близки к температурам вмещающих пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока http;//www.maps.nrcgit.ru/geoterm/
2. Глубинное строение и металлогения Восточной Азии / отв. Ред. А.Н. Диденко. – Владивосток: Дальнаука, 2010, –332 с.
3. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. – М.: Наука, 1990. – 662.
4. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии. М. ГЕОС, 2000, 226 с.
5. Л.М. Парфёнов, Н.А. Берзин, А.И. Ханчук, Г. Бадарч, В.Г. Беличенко, А.Н. Булгатов, С.И. Дриль, Г.Л. Кириллова, М.И. Кузьмин, У. Ноклеберг, А.В. Прокопьев, В.Ф. Тимофеев, О. Томуртогоо, Х. Янь Модель формирование орогенных поясов центральной и северо-восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2003. том 22. № 6. С. 7-41.
6. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Соловьёв В.М., Шибаев С.В., Петров А.Ф., Горнов П.Ю., Шестаков В.Н., Бойко Е.В., Тимофеев А.В. Межплитные границы Дальневосточного региона России по результатам GPS измерений, сейсморазведочных и сейсмологических данных // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (4) , С. 489–507.
7. Чехов А.Д. Тектоническая эволюция северо-востока Азии – М.: Научный мир, 2000 г. – 204 с.
8. Charlees DeMets, Richard G. Gordon and Donald F. Argus Geologically current plate motions // Geophys, J. Int., 2010, P 181, 1-80.
9. Word Date Center http;//www.wdcb.ru/sep/data html/
10. Zhai Yusheng, Deng Jun, Tang Zhoung et al. Metallogenic systems on the paleocontinental margin of the North China craton // Acta Geologica Sinica , 2004, V. 78, № 2. p. 592–603.

УДК 550.360:551.583

КОРРЕКТИРОВКА ВРЕМЕННОЙ ШКАЛЫ ГЕОТЕРМИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ ПАЛЕОКЛИМАТА НА ОСНОВЕ ОРБИТАЛЬНЫХ ИНСОЛЯЦИОННЫХ КРИВЫХ

А.А. Горностаева, А.Н. Антипин*, free_ride_@mail.ru*
Институт геофизики УрО РАН им. Ю.П. Булашевича, Екатеринбург, Россия

Представлена новая методика уточнения хронологии геотермических реконструкций палеоклимата, основанная на совместной инверсии изменений температуры земной поверхности (GST) и климатически обусловленного теплового потока через поверхность (SHF) и сопоставлении последних с вариациями инсоляции на длинных временных шкалах. Описаны примеры реализации методики на реальных данных. Сформулированы основные преимущества и ограничения предлагаемого подхода.

THE CORRECTION OF THE GEOTHERMAL PALEOCLIMATE RECONSTRUCTION CHRONOLOGY BASED ON ORBITAL INSOLATION CURVES

A.A. Gornostaeva, A.N. Antipin*, free_ride_@mail.ru*
Institute of Geophysics of the Urals Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

A new method to improve the chronology accuracy of geothermal paleoclimate reconstructions is presented. The method is based on a simultaneous inversion of ground surface temperature (GST) and surface heat flux (SHF) histories, and comparison of SHF with insolation variations on long timescales. An example of the method application to the experimental data are described. The main advantages and shortcomings of the suggested approach are outlined.

Геотермический метод реконструкции палеоклимата широко используется в палеоклиматологии. Реконструкции, полученные путем инверсии данных скважинной термометрии, обладают низким временным разрешением, однако позволяют оценивать долговременные, и, следовательно, глобальные климатические тренды [1, 2]. Временная привязка реконструированных климатических эпизодов в данном методе определяется скоростью распространения тепловых волн в геологической среде, зависящей от значения температуропроводности пород. В реальной среде эта скорость может отличаться от той, что рассчитана с помощью коэффициента температуропроводности, определенного по лабораторным образцам. Это связано с присутствием ряда некондуктивных факторов теплопереноса, таких как замерзание и оттаивание поровой влаги, фильтрация подземных вод. В связи с этим временная шкала геотермических палеоклиматических реконструкций может искажаться.

Стоит отметить, что проблема построения палеотемпературных хронологий свойственна и другим методам восстановления палеоклимата. Для ее решения применяются различные методики синхронизации временных шкал, среди которых – совместный анализ реконструкций, полученных по разным данным (например, сопоставление изотопной хронологии, полученной из анализа ледовых кернов, с длительной изотопной древесно-кольцевой хронологией, которая привязана к временной шкале с точностью до года) [3, 4], а также так называемая методика орбитальной подгонки (orbital tuning). Суть ее заключается в синхронизации изотопных ($\delta^{18}O$, δD) палеотемпературных хронологий с орбитальными инсоляционными кривыми в предположении о том, что главным фактором изменений температуры земной поверхности являлось внешнее радиационное воздействие [5, 6]. Однако в реальности температурная реакция на изменение потока приходящего к поверхности тепла всегда происходит с задержкой [7, 8], которая не учитывается при орбитальной подгонке, что вносит определенную погрешность в получаемую хронологию.

Геотермический метод обладает уникальной возможностью одновременно реконструировать изменения двух независимых климатических параметров – температуры

земной поверхности (ground surface temperature – GST) и дополнительного теплового потока через поверхности (surface heat flux – SHF), который характеризует долю внешней радиации, прошедшую сквозь земную поверхность и изменившую теплосодержание верхней части земной коры. Тепловой поток является энергетической характеристикой, и, следовательно, логично предположить отсутствие временного сдвига между вариациями SHF и внешнего радиационного воздействия. Это позволяет корректировать временную шкалу геотермических реконструкций, сопоставляя тепловую историю (историю SHF) с данными об изменении приходящей радиации аналогично процедуре орбитального тьюнинга. Одновременно меняется и хронология температурной реконструкции, а также вносится необходимый сдвиг между внешним тепловым воздействием и температурной реакцией на него.

Итак, предлагаемая методика уточнения хронологий геотермических реконструкций палеоклимата реализуется следующим образом. Первоначально температурная (GST) и тепловая (SHF) истории реконструируются при некотором априорно заданном значении температуропроводности (например, $a = 1\cdot10^{-6}$ м^2/с). SHF историю можно получить непосредственно из инверсии термограммы. Однако удобнее рассчитать кривую изменения теплового потока по реконструированной температурной истории. Алгоритмы расчета изменений SHF по известным вариациям GST были предложены в работах [9, 10] и, более точный, – в [11, 12]. Исходная температурная история представляется суммой степенных функций

$$T_i = T_0 + \sum_{j=1}^{i} D_j \left(i - j + 1\right)^{\frac{n}{2}}, \tag{1}$$

где n = 0, 1, 2, 3; i, j – положительные целые числа, определяющие временную шкалу $t = i\cdot\Delta t$, $t = j\cdot\Delta$t, Δt – интервал дискретизации. По температурной кривой GST для заданных значений n и Δt находят D_i с помощью рекуррентного соотношения

$$\begin{aligned} D_1 &= T_1 - T_0, \\ D_i &= \left(T_i - T_0\right) - \sum_{j=1}^{i-1} D_j \left(i - j + 1\right)^{\frac{n}{2}}, \quad i > 1. \end{aligned} \tag{2}$$

Используя соотношение

$$q_i = k_n \frac{E}{\sqrt{\Delta t}} \sum_{j=1}^{i} D_j \left(i - j + 1\right)^{\frac{n-1}{2}}, \tag{3}$$

где E – коэффициент тепловой активности пород ($E = \sqrt{\lambda\rho C} = \lambda / \sqrt{a} = \rho C\sqrt{a}$), рассчитывают "мгновенные" значения потока в узлах дискретизации. Коэффициент k_n в соотношении (3) определяется через гамма-функцию: $k_n = \Gamma(0.5n + 1)/\Gamma(0.5n + 0.5)$. Существенному повышению точности восстановления изменений SHF способствует оценка среднего значения теплового потока на каждом интервале дискретизации [11]:

$$\overline{q_{i-0.5}} = q_{i-1} + \frac{2}{n+1}\left(q_i - q_{i-1}\right). \tag{4}$$

Для корректировки временной шкалы геотермических реконструкций производится построение взаимной корреляционной функции кривых SHF и внешнего радиационного воздействия, по максимуму которой оценивается оптимальный коэффициент температуропроводности и, соответственно, необходимая степень растяжения или сжатия временной шкалы относительно даты каротажа. Одновременно с хронологией изменений SHF корректируется временная шкала температурной истории. Стоит отметить, что разрешающая способность геотермического метода убывает по мере удаления в прошлое. Поэтому для корректного сопоставления необходимо, чтобы сравниваемая с тепловым потоком радиационная кривая имела такую же разрешающую способность. Это достигается путем сглаживания радиационной кривой в скользящих окнах переменной ширины.

Алгоритм восстановления изменений теплового потока по известной истории изменения температуры земной поверхности, а также процедура синхронизации временных

шкал геотермических палеоклиматических реконструкций были реализованы в виде компьютерной программы PaleoTHF. В настоящее время данное приложение проходит государственную регистрацию.

Надежные результаты использования методики синхронизации были получены для длительной (последние 40 тыс. лет) температурной истории земной поверхности, реконструированной на Урале [13]. В качестве характеристики внешнего радиационного воздействия для данного временного интервала было выбрано изменение среднегодовой инсоляции на широте 60º с.ш., связанное с вариациями параметров земной орбиты [14]. Применение описанной методики позволило достичь корреляции в 99% между кривыми теплового потока и инсоляции в интервале 35–6 тыс. л.н. (рис. 1), варьируя значение температуропроводности в пределах ее естественной изменчивости (до значения $0.71 \cdot 10^{-6}$ м^2/с) [12].

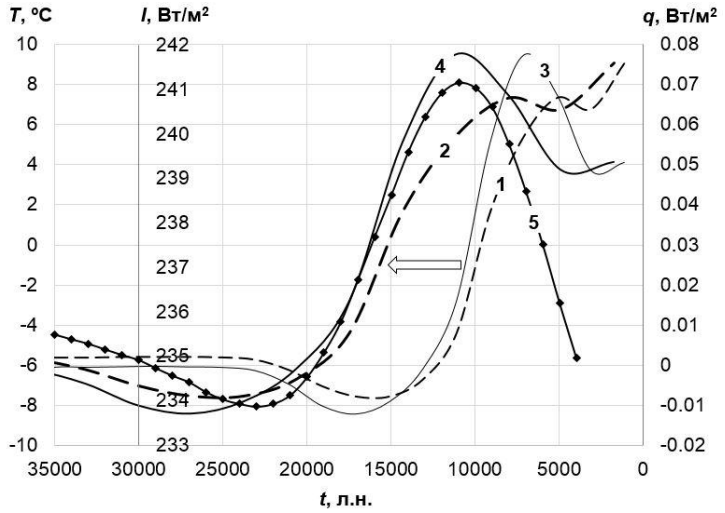


Рис. 1. Корректировка временных шкал геотермических реконструкций на Урале. (1, 3) – GST и SHF, соответственно, реконструированные при $a = 1 \cdot 10^{-6}$ м^2/с (E = 2500 Дж·м$^{-2}$·К$^{-1}$·с$^{-1/2}$) [13]; (2, 4) – GST и SHF, соответственно, после применения методики синхронизации для оптимального $a = 0.71 \cdot 10^{-6}$ м^2/с [12]; (5) –инсоляция I на широте 60º с. ш. [14]

Методика орбитальной синхронизации теплового потока была применена также для уточнения хронологий палеоклиматических реконструкций (последние 40 тыс. лет), полученных в Карелии [15] (рис. 2а) и в Канаде [16] (рис. 2б). Оптимальные значения теплопроводности составляют $a = 0.75 \cdot 10^{-6}$ м^2/с [15] и $a = 0.94 \cdot 10^{-6}$ м^2/с для Карелии и Канады соответственно.

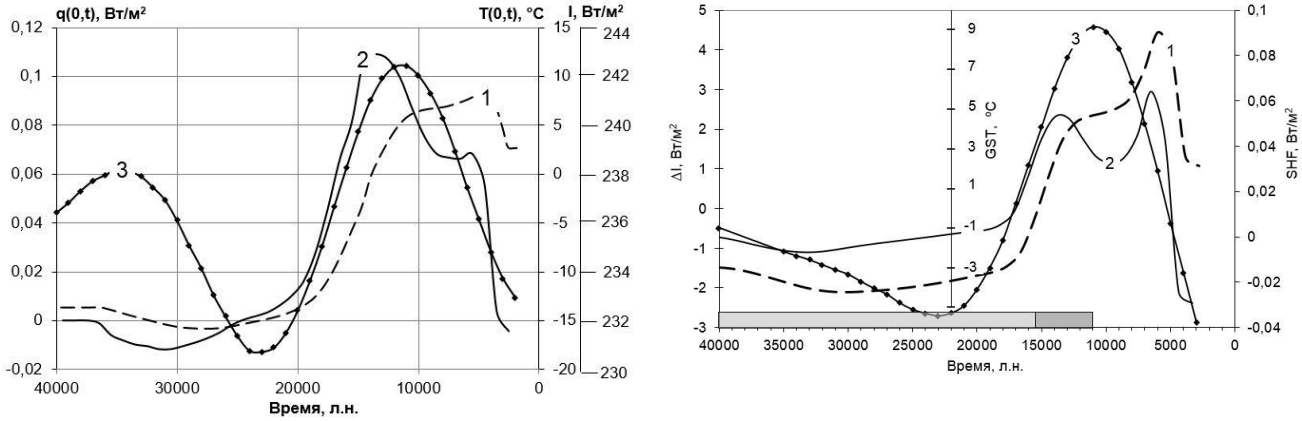


Рис. 2. Геотермические реконструкции GST и SHF историй, скорректирванные по орбитальной инсоляционной кривой [14]: **а** – для Карелии (оптимальное значение температуропроводности $a = 0.75 \cdot 10^{-6}$ м^2/с [15]), 1 – GST, 2 – SHF, 3 – инсоляция I; **б** – для Канады (оптимальное значение температуропроводности $a = 0.94 \cdot 10^{-6}$ м^2/с), 1 – GST, 2 – SHF, 3 – изменение инсоляции I, серая полоса – присутствие ледника.

Методика орбитальной синхронизации теплового потока предполагает линейную зависимость между изменениями потока внешней радиации (инсоляции) и поглощенного Землей теплового потока. Такое предположение не вызывало возражений при исследовании климата Среднего Урала, где, как известно [17], не существовало позднеплейстоценовых ледниковых покровов. Сложнее оправдать применение орбитальной синхронизации для Карелии и Канады – регионов, длительное время покрытых ледниками: Скандинавским [18] и Лаврентийским [19] соответственно. В этих условиях достоверность геотермических хронологий, скорректированных по орбитальной инсоляционной кривой, подтверждается независимыми свидетельствами температурного режима и динамики деглациации [20–22].

Опыт применения методики корректировки геотермических хронологий к реальным реконструкциям позволил сформулированы следующие ограничения ее использования.

— Разработанная методика наиболее применима к реконструкциям долговременных климатических изменений – порядка десятков тысяч лет. Это ограничение связано с предположением линейной зависимости между изменениями внешнего радиационного воздействия и теплового потока, поглощенного Землей. На более коротких временных интервалах может присутствовать сопоставимое с длительностью временной шкалы запаздывание реакции теплового потока на изменения внешнего радиационного воздействия.

— Методику следует применять с осторожностью к палеоклиматическим реконструкциям в районах древнейших оледенений. В таких случаях для верификации полученных палеохронологий необходимо использовать дополнительные источники информации о динамике дегляциации, либо иные косвенные свидетельства и маркеры для временной привязки восстановленных климатических событий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 14-05-31055 мол_а.

Список литературы

1. Демежко Д.Ю. Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). Екатеринбург: УрО РАН, Екатеринбург, 2001. 144 с.
2. Bodri L., Cermak V. Borehole climatology. A new method on how to reconstruct climate. Elsevier Science, 2007. 352 pp.
3. Волков Ю.В., Тартаковский В.А. Алгоритм синхронизации хронологических рядов // Известия Томского политехнического университета, Т. 315, № 5, 2009. С. 61–64.
4. Сидорова О.В., Наурзбаев М.М., Ваганов Е.А. Динамика климата позднего голоцена севера Евразии по данным ледниковых кернов Гренландии и длительных древесно-кольцевых хронологий // Известия РАН. Серия географическая, № 1, 2007. С. 95–106.
5. Martinson D.G., Pisias N.G., Hays J.D., Imbrie J., Moore T.C., and Shackleton N.J. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0–300 000 years chronostratigraphy // Quat. Res, 1987. V. 27. P. 1–30.
6. Dreyfus G.B., Parrenin F., Lemieux-Dudon B., Durand G., Masson-Delmotte V., Jouzel J., Barnola J.-M., Panno L., Spahni R., Tisserand A., Siegenthaler U., and Leuenberger M. Anomalous flow below 2700m in the EPICA Dome C ice core detected using ^{18}O of atmospheric oxygen measurements // Clim. Past., 2007. V. 3. P. 341–353.
7. Pielke Sr. R. A. Heat storage within the Earth system // Bull. Am. Meteorol. Soc., V. 84, P. 331–335, 2003.
8. Douglass D. H., Knox R. S. Ocean heat content and Earth's radiation imbalance, II. Relation to climate shifts // Phys. Lett. A., V. 376, P. 1226–1229, 2012.
9. Beltrami H., Smerdon J. E., Pollack H. N., and Huang S. Continental heat gain in the global climate system // Geophys. Res. Lett, 2002, V. 29, № 8, P. 8-1–8-3.

10. Bennett W. B., Wang J., Bras R. L. Estimation of global ground heat flux // Journal of Hydrometeorology, 2008, V. 9(4), P. 744–759.
11. Горностаева А.А. Алгоритм расчета изменений теплового потока через земную поверхность по данных об изменения температуры земной поверхности // Уральский геофизический вестник, № 1, 2014, С. 37-45.
12. Demezhko D.Y., Gornostaeva A.A. Late Pleistocene–Holocene ground surface heat flux changes reconstructed from borehole temperature data (the Urals, Russia) // Clim. Past, 11, 647-652, 2015, doi:10.5194/cp-11-647-2015.
13. Demezhko D. Y., Shchapov V. A. 80 000 years ground surface temperature history inferred from the temperature-depth log measured in the superdeep hole SG-4 (the Urals, Russia) // Glob. Planet. Change, 29, 219–230, 2001.
14. Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million of years // Quaternary Sciences Review, 1991, V. 10, №4, P. 297–317 (data from http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_EARTH_LAND_NGDC_PALEOCLIM_INSOL.html).
15. Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Tarkhanov G.V., Esipko O.A. 30,000 years of ground surface temperature and heat flux changes in Karelia reconstructed from borehole temperature data // Bull. Geogr., No. 6, 2013, P. 7–25.
16. Majorowicz J., Šafanda J. Effect of postglacial warming seen in high precision temperature log deep into the granites in NE Alberta // International Journal of Earth Sciences. 2014. P. 1–9.
17. Velichko A.A., Kononov Yu.M., Faustova M.A. The last glaciation of Earth: size and volume of ice-sheets // Quaternary International. 1997. V. 41. P. 43–51.
18. Lunkka J.P., Saarnisto M., Gey V.P., Demidov I., and Kiselova V. Extent and age of the Last Glacial maximum in the southeastern sector of the Scandinavian Ice Sheets // Global and Planetary Change, 2001, V. 31, P. 407–426.
19. Stokes C.R., Tarasov L., Dyke A.S. Dynamics of the North American Ice Sheet Complex during its inception and build-up to the Last Glacial Maximum // Quaternary Science Reviews, 2012, V. 50, P. 86–104.
20. Tarasov L., Peltier W.R. Impact of thermomechanical ice sheet coupling on a model of the 100 kyr ice age cycle // J. Geophys. Res, 1999, V. 104, P. 9517–9545.
21. Dyke A.S. An outline of North American deglaciation with emphasis on central and northern Canada // Quaternary glaciations: extent and chronology, 2004, V. 2, P. 373–424.
22. Murton J.B., Bateman M.D., Dallimore S.R., Teller J.T., and Yang Z. Identification of Younger Dryas outburst flood path from Lake Agassiz to the Arctic Ocean // Nature. 2010. V. 464(7289). P. 740–743.

УДК 550.837

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАЛОГЛУБИННОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПЛОТИНЫ ЕЛЬЧЕВСКОГО ПРУДА-ОТСТОЙНИКА

В.Ю. Горшков, С.В. Байдиков, В.А. Давыдов
vitalaa@yandex.ru, badikek@mail.ru, davyde@yandex.ru
ИГФ УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Описано исследование насыпных гидротехнических сооружений методами малоглубинной электроразведки. Приведены результаты полевых работ на насыпной плотине р. Ельчёвка. Показана высокая эффективность использованных методов малоглубинной электроразведки для изучения состояния насыпных плотин.

Ключевые слова: электромагнитное поле, индукционное зондирование, эффективное сопротивление, кажущееся сопротивление, плотина, фильтрация.

USE SHALLOW ELECTRICAL SOUNDING METHODS IN THE STUDY OF ILICHEVKA DAM

Gorshkov Vitaliy, Baydikov Sergey, Davydov Vadim
vitalaa@yandex.ru, badikek@mail.ru, davyde@yandex.ru
Institute of Geophysics, UB RAS, Yekaterinburg

Summary. Description of study of bulk hydraulic structures by shallow electrical sounding methods is given. Results of field work on artificial dam Ilichevka river are listed. High efficiency of shallow electrical sounding methods for the study of state artificial dams state is shown.

Keywords: electromagnetic field, induction sounding, effective resistivity, apparent resistivity, dam, filtration.

При электрометрических исследованиях насыпных гидротехнических сооружений (ГТС) обычно применяют разновидности методов сопротивлений, как с использованием многоэлектродных установок (электротомография), так и классические вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ). При этом в основном используются кондуктивные способы возбуждения и регистрации электрических полей. При отсутствии возможности обеспечить надёжный контакт электродов с исследуемой зоной, например, при асфальтовом покрытии, возникает необходимость прибегать к бесконтактным методам электроразведки [1], таким, как дистанционные индуктивные зондирования (ДИЗ). Цель данной работы заключалась в оценке возможности применения комплекса методов малоглубинной электроразведки (ВЭЗ и ДИЗ) для исследования состояния ГТС.

Геофизические работы проводились на насыпной плотине пруда-отстойника донных отложений, образующихся в результате нейтрализации кислых дренажных вод Дегтярского рудника на р. Ельчевка в Свердловской области. Плотина расположена в 9 км к северу от г. Дегтярска, она сложена преимущественно суглинком с примесью щебня, имеет протяженность около 700 м., ширину верхней кромки 8-10 м. и высоту 9-13 м. Сток осуществляется через нерегулируемый водосбросный канал в восточном краю плотины, пробитый в скальном грунте. Следуя по протоке, вода из пруда-отстойника попадает в Волчихинское водохранилище – основной источник питьевого водоснабжения г.Екатеринбурга. В основании плотины три типа коренных пород субвертикального залегания: порфириты, туфы и известняки. Осадочные образования состоят из элювиальных и делювиальных отложений коры выветривания коренных пород, торфа и аллювия долины р.Ельчевка. Гранулометрический состав рыхлых отложений включает всю шкалу – от глин до крупнообломочного материала (щебень, глыбы).

Полевые наблюдения методами ВЭЗ были выполнены с помощью цифровой электрометрической станции ЭРА-МАХ (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург). При измерениях методом ВЭЗ использовалась симметричная установка Шлюмберже (AMNB) с разносами

питающей линии AB/2 от 1,5 до 100 м. Глубина исследования принималась равной четверти разноса AB: $h_{эф}$ = AB/4 [2]. Для построения геоэлектрических разрезов рассчитывалось кажущееся электрическое сопротивление по формуле $\rho_к = k\Delta U/I$, где k – коэффициент установки ВЭЗ; ΔU – измеренная на приёмной линии разность потенциалов; I – сила тока в питающей линии. Рабочая частота составляла 4,88 Гц, заземление генераторной и приемной линии осуществлялось с помощью стальных электродов.

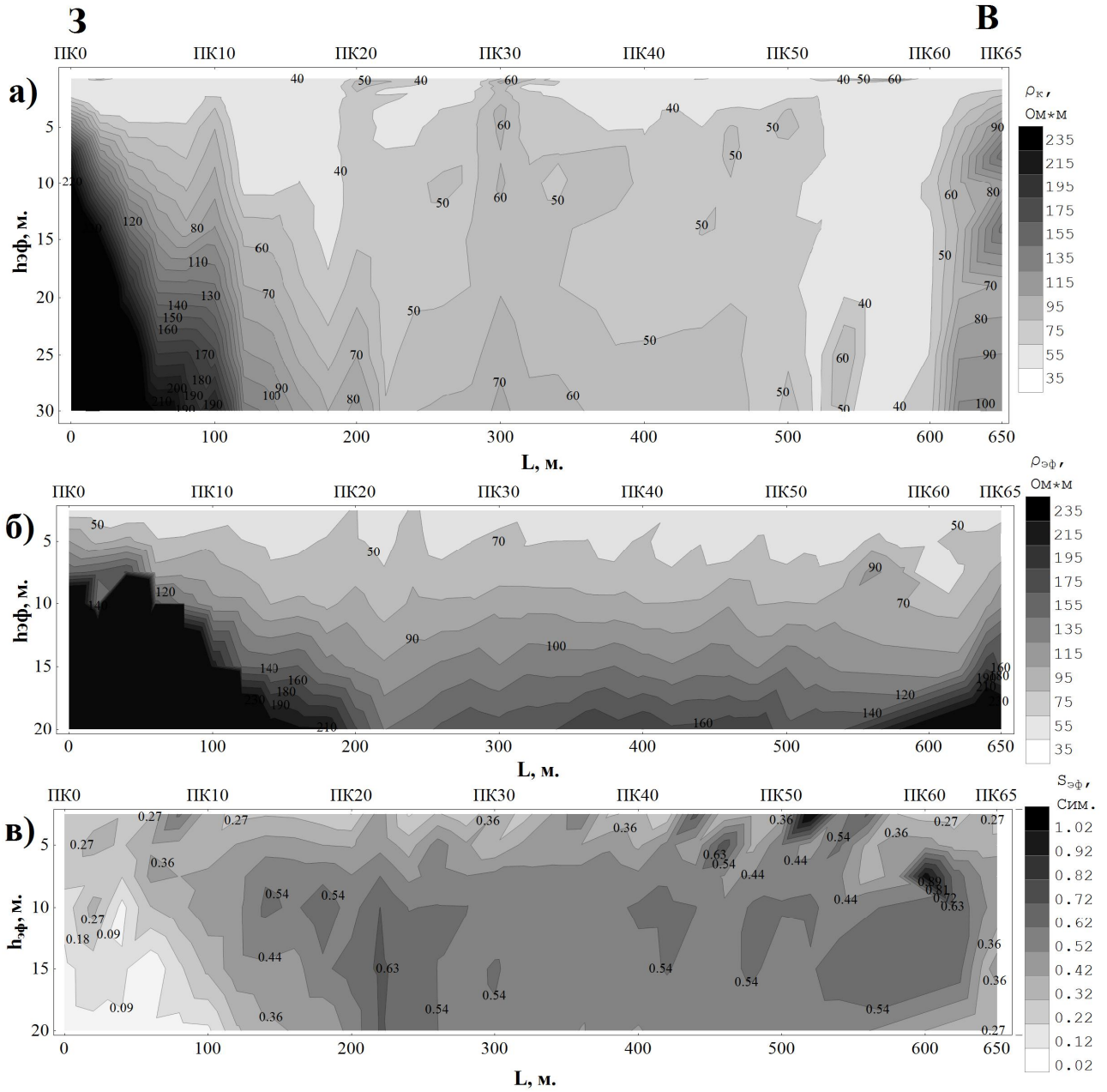


Рис. 1. а) разрез кажущегося электросопротивления по данным ВЭЗ
б) разрез эффективного электросопротивления по данным ДИЗ
в) разрез эффективной продольной проводимости

Полевые наблюдения методом ДИЗ были выполнены с помощью индукционной аппаратуры МЧЗ-8 (ИГФ УрО РАН, г.Екатеринбург) [3]. Комплект аппаратуры состоит из генератора переменного тока с рамочным излучателем электромагнитного поля в виде вертикального магнитного диполя (ВМД) и измерительного блока с чувствительным магнитоприемником индукционного типа. ДИЗ проводились на частоте 10,2 кГц в области малых и средних параметров электромагнитного поля $P = |k|*r < 10$ [4]. Методика измерений заключалась в регистрации трёх модулей взаимно перпендикулярных компонент

напряжённости магнитного поля (Hz, Hr, Hφ) на разных разносах генератора от приемника, генератор относился в западном направлении на требуемое расстояние r до 80 м. Глубина исследования принималась равной четверти расстояния между генератором и приемником: $h_{эф}$ = r/4 [5]. Обработка данных заключалась в расчете эффективного удельного электрического сопротивления (УЭС) для низкочастотной асимптотики по формуле [4, 5, 6] $\rho_{эф}=2\ f\ r^2\ H_z/H_r$, где f – рабочая частота, Гц; r – расстояние между приёмником и генератором, км.; H_z –вертикальная составляющая напряжённости магнитного поля, А/м; H_r –радиальная составляющая напряжённости магнитного поля, А/м. Дополнительным электрометрическим параметром выступила продольная проводимость $S_{эф}= r/\rho_{эф}$.

На всех геоэлектрических разрезах по результатам ВЭЗ и ДИЗ (рис. 1а, 1б, 1в) видно, что в западной и восточной частях исследуемой области к поверхности приближаются коренные, наиболее высокоомные породы (сопротивлением более 100 Омм). В районе пикета 22 и на разрезах ВЭЗ и на разрезах ДИЗ отмечается контакт порфиритов, расположенных под западной частью плотины и коры выветривания туфов, расположенной восточнее. В самом теле плотины низкими значениями наблюдённых кажущихся сопротивлений отмечаются пикеты с 52-го по 60-й, эта зона может представлять собой сильно обводнённый участок плотины и свидетельствовать о наличии возможной протечки в теле плотины на данном интервале. Прямым свидетельством повышенной фильтрации являются выходы ручьёв со стороны нижнего бьефа плотины, напротив ПК52 и ПК56, в основании низового откоса. На разрезе $S_{эф}$ (рис. 1в) также хорошо выделяется зона повышенной фильтрации в районе пикетов 52-56.

Полученные результаты измерений методами ВЭЗ и ДИЗ хорошо коррелируют с данными геологии и видимым состоянием плотины и позволяют утверждать, что методы малоглубинной электроразведки позволяют исследовать глубинные структуры, относящиеся к основанию плотины, и обнаруживать обводнённые участки в теле плотины, предоставляя полную картину состояния ГТС.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект №15-2-5-31.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдов В.А., Человечков А.И., Байдиков С.В. Инженерные геофизические исследования плотин г. Екатеринбурга // Международный научно-промышленный симпозиум «Уральская горная школа – регионам» // Сборник докладов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2009. С. 40–43.

2. Матвеев Б.К. Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. Учебник для вузов. М.: Недра, 1985. – 375 с.

3. Байдиков С.В, Человечков А.И. Аппаратура для высокочастотных индукционных зондирований МЧЗ–8 // Екатеринбург: Уральский Геофизический Вестник № 1, 2011 г, с. 4–8.

4. Титлинов В.С., Журавлева Р.Б. Технология дистанционных индуктивных зондирований. – Екатеринбург: УИФ “Наука”, 1995. – 58 с.

5. Журавлева Р.Б., Самоделкина С.А., Бакаев В.П. К выбору интерпретационных параметров при дистанционном зондировании и профилировании с аппаратурой ДЭМП–СЧ // Российский геофизический журнал. №2–4, 1994. С. 67–70.

6. Вешев А.В., Ивочкин В.Г., Игнатьев Г.Ф. Электромагнитное профилирование. – Л.: Недра, 1971. – 216 с.

УДК 550.34

МОДЕЛИ СВОДНЫХ ИЗОСЕЙСТ ИСТОРИЧЕСКИХ И СОВРЕМЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОТРЯСЕНИЙ ОТ I_6 ДО I_{10-11} БАЛЛОВ

В.В. Гребенникова, *grvalentina@mail.ru*
Институт сейсмологии, Национальная Академия Наук КР, Бишкек, Кыргызстан

Аннотация.

В целях улучшения методов обработки и построения карт по результатам макросейсмических исследований представлены двумерная и трёхмерная модели сводных карт интенсивности сейсмических сотрясений от I_6 до I_{10-11} баллов населённых пунктов и объектов вследствие исторических (начиная с 250 г. до н.э.) и современных землетрясений по 2014 г. в пределах координат φ=39,00°- 43,00° N, λ=69,00°- 81,00° E. Всего использованы данные 293 сейсмособытий.

MODELS OF COMBINED ISOSEISMALS OF HISTORICAL AND MODERN EARTHQUAKES WITH INTENSITY OF SEISMIC SHOCKS FROM I_6 TO I_{10-11} POINTS

V.V. Grebennikova, *grvalentina@mail.ru*
Institute of seismology HAH KP, Bishkek, Kyrgyzstan

Abstract

Two-dimensional and three-dimensional models of combined maps of intensity of seismic shocks from I_6 to I_{10-11} for settlements and facilities due to historical (since 250 BC) and modern earthquakes (to 2014) within the coordinates φ=39,00°- 43,00°N, λ=69,00°- 81,00°E are presented for improvement of processing methods and mapping the results of macroseismic studies. In total data of 293 seismic events were used.

Кыргызстан занимает большую часть Тянь-Шаньского орогена. На севере и западе Кыргызский Тянь-Шань граничит с Казахским щитом и Туранской плитой, на юге – с Таримской платформой и Памиром и испытывает сильное субмеридиональное и северо-западное сжатия, которые являются одной из причин возникновения многочисленных землетрясений. Важная структурная линия – глубинный трансорогенный Таласо-Ферганский разлом (рис. 1, №1), делит территорию Кыргызского Тянь-Шаня на два региона – Северо-Восточный Тянь-Шань (**СВ Т-Ш**) и Юго-Западный Тянь-Шань (**ЮЗ Т-Ш**) [1], которые различаются геологическим строением, сейсмической активностью и проявлением сильных землетрясений с гипоцентрами, в основном, на глубинах от 10 до 20 км [1-5] .

На рис. 1 видно, что в **СВ Т-Ш** очаги землетрясений интенсивностью от 8-9 до 11 баллов группируются в Южно-Чуйской (I=9-10 Беловодское 1885 г., I=8-9 Баласагынское 1475 г.), Джумгало-Суусамырской (I=9 Суусамырское 1992 г.) сейсмогенных зонах и в горном обрамлении Иссык-Кульской впадины (I=10-11 Кеминское 1911 г., I=10 Чиликское 1889 г., I=9-10 Верненское 1887 г., I=8-9 Кемино-Чуйское 1938 г., Саракамышское 1970 г. и Жаланаш-Тюпское 1978 г.). Центральная часть **СВ Т-Ш** характеризуется, в основном, проявлением землетрясений интенсивностью от 6 до 7-баллов и редким проявлением событий более высокой интенсивности (I=7-8 землетрясение 1915 г. и Коштюбинское 1997 г.). Южная часть **СВ Т-Ш** подвержена сотрясениям от землетрясений интенсивностью 8 баллов и более, произошедших в Гиссаро-Кокшаальской сейсмогенной зоне (I=10 Кашгарское 1902 г., I=9 Пычанское 1961 г., Учтурфанское 1969 г., I=8-9 землетрясения в 1893 г. и 1927 г., I=8 Учтурфанское-3 и Кельпинтагское 1971 г. и др.).

ЮЗ Т-Ш характеризуется более высокой сейсмической активностью и проявлением сильных землетрясений интенсивностью от 8 до 10 баллов: I=9-10 Чаткальское 1946 г., I= 9 Андижанское 1902 г., I=8-9 Куршабское 1924 г., Дараут-Курганское 1978 г., I=8

Кастакозское 1888 г, Аимское 1903 г., Исфара-Баткенское 1977 г., Нура-Алайское 2008 г. и Канское 2011 г., I=7-8 Уратюбинские 1897 г.

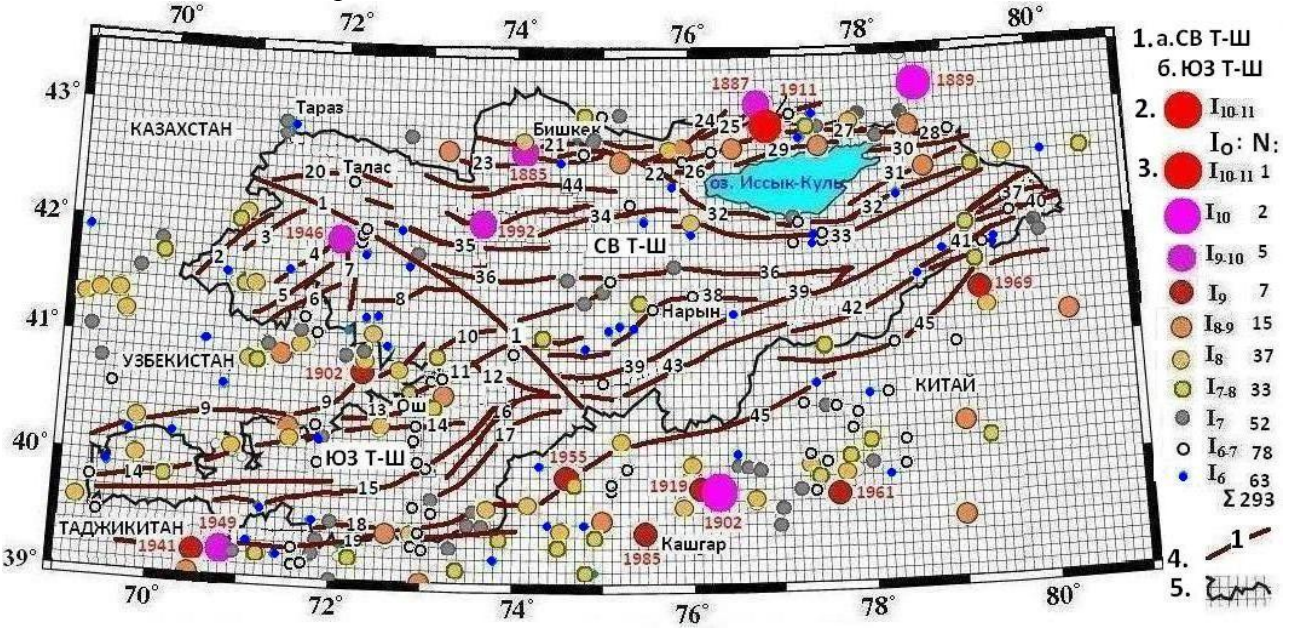


Рис. 1. Карта-схема распределения эпицентров землетрясений M≥4,6 с интенсивностью сотрясения (I) в эпицентре 6 и более баллов, произошедших с исторических времен по 2014 г. в координатах φ=39,00°-43,50°N, λ=69,00°-81,00°E [6-7]: **1. а. СВ Т-Ш** (Северо-Восточный Тянь-Шань), **б. ЮЗ Т-Ш** (Юго-Западный Тянь-Шань) [1]; **2.** Эпицентры землетрясений с M≥4,6 [4-5,8-9]; **3.** Интенсивность сейсмических сотрясений (I) в эпицентре (красным шрифтом указана дата землетрясений с I≥9 баллов) [4-5]; **4.** Разломы [1, 10]: 1. Таласо-Ферганский, 2. Пскемский, 3. Южно-Чандалашский, 4. Атойнокский, 5. Алабугинский, 6. Северо-Ферганский, 7. Карасуйский, 8. Арсланбобский, 9. Южно-Ферганский, 10. Мадино-Талдысуйский, 11. Карадарьинский, 12. Тарский, 13. Катарский, 14. Южно-Наукатский, 15.Туркестано-Алайский, 16. Гульчинский, 17. Ойтальский, 18. Заалайский, 19. Дарваз-Каракульский, 20. Южно-Таласский, 21. Иссык-Атинский, 22. Шамси-Тюндюкский, 23. Чон-Курчакский, 24. Предзаилийский (Каракунузский), 25. Чилико-Кеминский, 26. Предкунгейский, 27. Северо-Аксуйский, 28. Талдысуйский, 29. Культорский, 30. Тасминский, 31. Каракольский (Иссык-Кульская впадина), 32. Предтерскейский, 33. Центрально-Терскейский, 34. Северо-Джумгальский, 35. Кетмень-Тюбинский, 36. Линия «Николаева», 37. Каиндинский, 38. Нарынский, 39. Атбаши-Инылъчекский, 40. Сары-Джазский (Куйлю-Сарыджазский), 41. Куюкапский, 42. Северо-Кокшаальский, 43. Южно-Атбашинский (Аксайский), 44. Каракольский (Суусамырская впадина), 45. Гиссаро-Кокшаальский; **5.** Государственная граница Кырыгзской Республики.

Высокая сейсмическая активность в приграничной с Таджикистаном полосе Кыргызстана связана с Дарваз-Каракульской сейсмогенной зоной, где произошли и происходят землетрясения интенсивностью 8 и более баллов: I=10 Хаитское 1949 г., I=9 Кашгарское 1985 г., Гармское 1941 г., Улуучатское 1955 г., I=8-9 землетрясение 1918 г., Дараут-Курганское 1978 г., I=8 Маркансуйское 1974 г. и др.

Для изосейст сильных землетрясений характерна большая область распространения, которая по форме, в основном, представляет разновеликие эллипсы. В зонах максимальных сотрясений (в плейстосейстовой области) длинная ось изосейст ориентирована по простиранию основных геологических структур, и форма изосейст корректируются неоднородностями строения геологических структур (рис. 2). Отмечается локализация (группирование) очагов сильных событий в областях динамического влияния активных разломов (рис. 1): **СВ Т-Ш** – Беловодская группа (Иссык-Атинский №22), Каджисай-Барскаунская (Предтерскейский №32) и др.; **ЮЗ Т-Ш** – Чаткальская группа (Таласо-

Ферганский №1, Атойнокский №4 и Карасуйский №7), Пскемско-Чаткальская (Южно-Чандалашский № 3) и др. Новое сильное землетрясение в пределах одной группы, возникает между очагами произошедших ранее сильных сейсмособытий в пределах динамического влияния одного разлома, т.е. наблюдается миграция очагов по разлому.

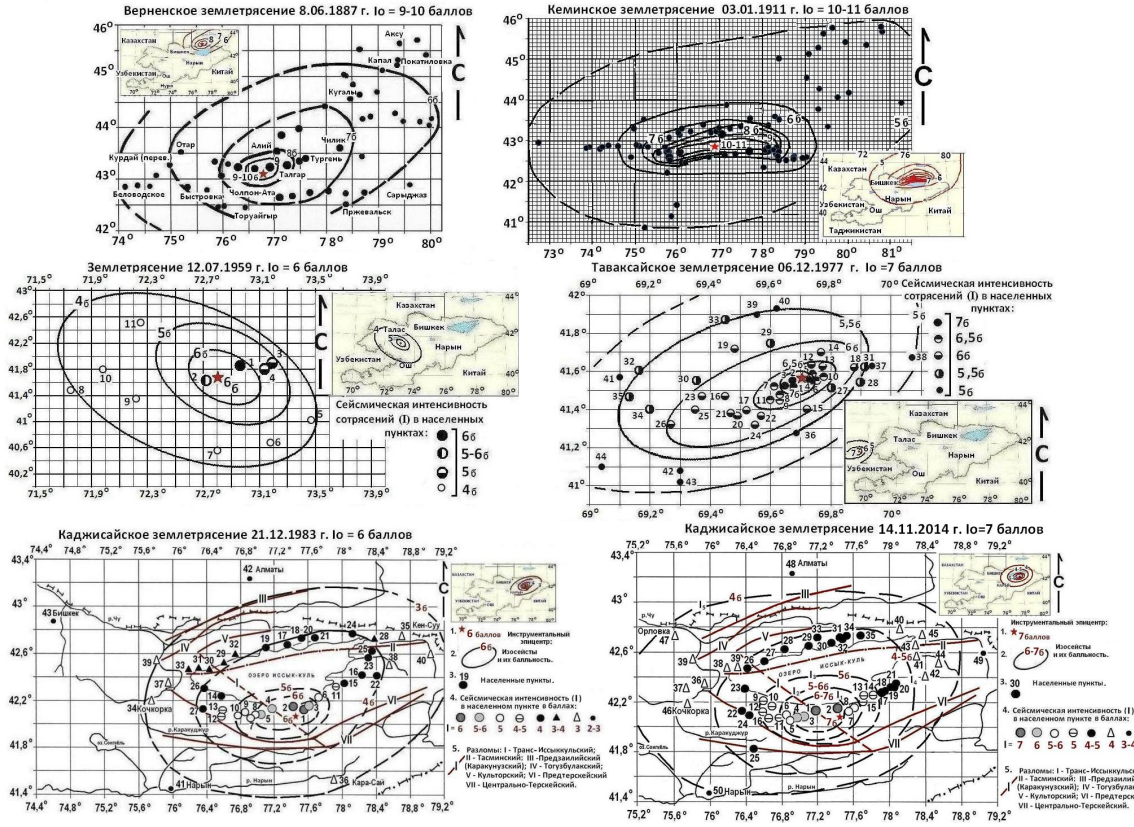


Рис. 2. Карты изосейст землетрясений с M≥4,6 интенсивностью сотрясений в эпицентре 6 и более баллов (построены по материалам [4, 11]).

За последние десятилетия на территории Кыргызского Тянь-Шаня произошла серия землетрясений с интенсивностью (I_o) в эпицентре 6 и более баллов: 1996, 1997 гг. I=6, 1998 г. I=6-7, Меркенское 2003 г. I=7, Сузакское 2003 г. I=6, Кочкорское 2006 г. I=8, Лейлякское 2007 г. I=7-8, Ош-Кокбельское 2008 г. I=6-7, Нуринское 2008 г. I=8, Канское 2011 г. I=8, Сарыжазское 2013 г. I=8, Каджисайское 2014 г. I=7. Это позволило провести переоценку сейсмической интенсивности сотрясений территории Кыргызстана и прилегающих территорий до 2014 г.

На основе макросейсмического материала по интенсивности сейсмических сотрясений населенных пунктов и объектов, от землетрясений с магнитудами M≥4,6 (293 сейсмособытия), составлен каталог по группам интенсивности сотрясений: **I_{10-11} - $I_{10,5}$, I_{9-10} - $I_{9,5}$, I_9, I_{8-9} - $I_{8,5}$, I_8, I_{7-8} - $I_{7,5}$, I_7, I_{6-7} - $I_{6,5}$, I_6**, ставшего базой данных (> 2000 точек) для построений серии карт. При составлении каталога, автором использовались сейсмические Каталоги работ [4-5, 8-9]. С помощью применения алгоритмов объемной триангуляции базы макросейсмических данных в среде программирования MATLAB, построены двухмерная (2D рис. 3) и трехмерная (3D рис. 4) модели карт интенсивности сейсмических сотрясений от **I_6** до **I_{10-11}** баллов [6-7].

Из рис. 3, демонстрирующего двухмерное представление интенсивности сейсмических сотрясений от **I_6** до **I_{10-11}** баллов (изолинии интенсивности через 0,5 баллов), построенной по декабрь 2014 г., видно, что основная часть территории Кыргызского Тянь-Шаня характеризуется 6, 6,5 и **7**-балльной интенсивностью сотрясений. Интенсивность сотрясения от 6 до 7 баллов в Тонском сейсмоактивном блоке (центральная часть Джумгало-Терскейской сейсмогенерирующей зоны Северного Тянь-Шаня) было подтверждено

14.11.2014 года 7-балльным Каджисайским землетрясением (φ=42,12° N, λ = 77,22° E; K=13,9; Mpv = 6,1; глубина очага (H) 19 км) рис. 2. [11].

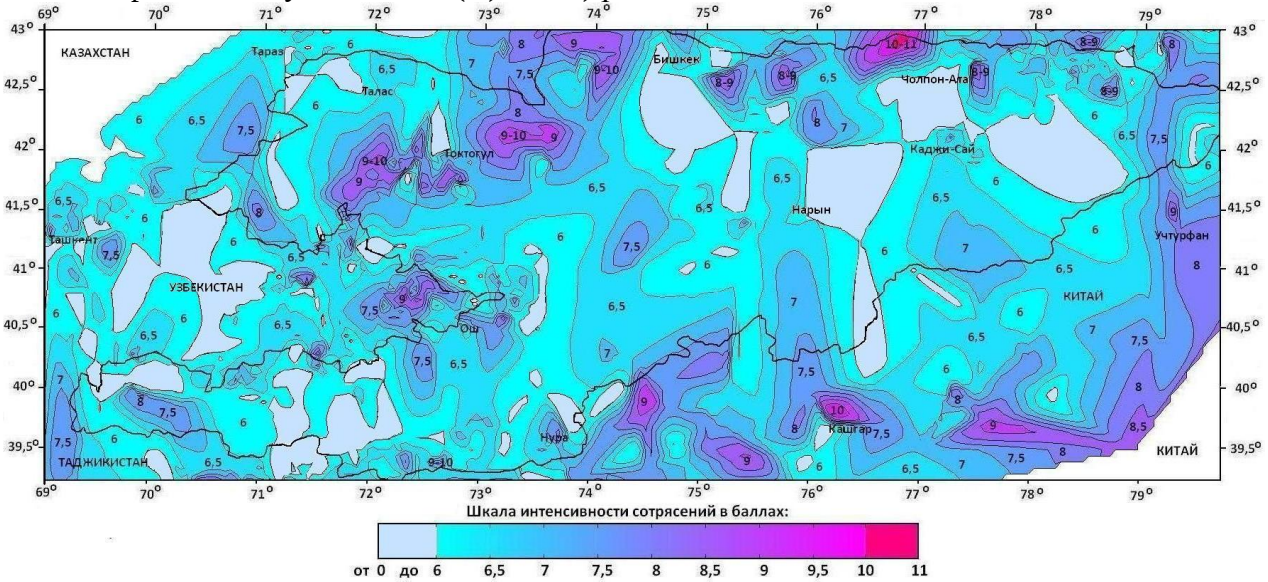


Рис. 3. Сводная карта 2D изосейст исторических и современных (по декабрь 2014 г.) землетрясений с M ≥ 4,6 с интенсивностью сейсмических сотрясений от $\mathbf{I_6}$ до $\mathbf{I_{10\text{-}11}}$ баллов (изолинии интенсивности через 0,5 баллов), в пределах координат φ = 39,00° – 43,00° N, λ = 69,00°- 80,00° E [7].

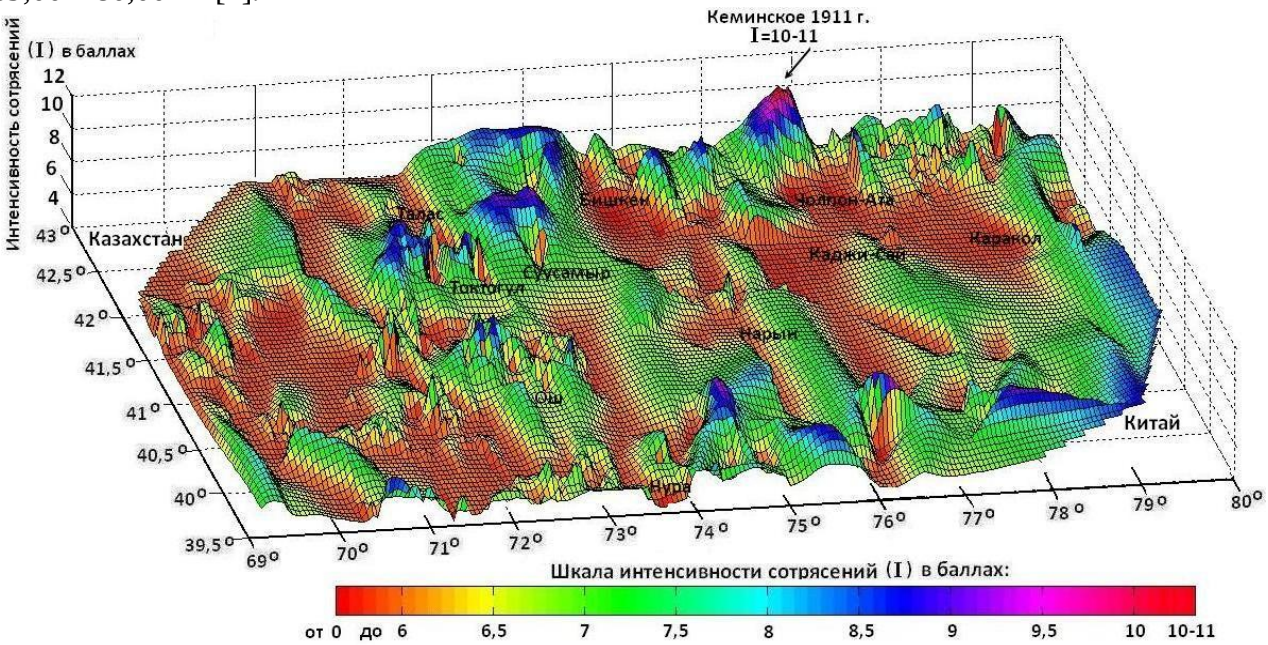


Рис. 4. Сводная карта 3D изосейст исторических и современных (по декабрь 2014 г.) землетрясений с M ≥ 4,6 с интенсивностью сейсмических сотрясений от $\mathbf{I_6}$ до $\mathbf{I_{10\text{-}11}}$ баллов (изолинии интенсивности через 0,5 баллов), в пределах координат φ = 39,50° – 43,00° N, λ = 69,00°- 80,00° E [7].

К 10, 9,5 и 9-балльной интенсивности сейсмических сотрясений относятся плейстосейстовые области Кеминского 1911 г., Беловодского 1885 г., Верненского 1887 г., Чаткальского 1946 г. и Суусамырского 1992 г. сильнейших землетрясений в Северо-Восточном Тянь-Шане; Андижанского 1902 г., Гармского 1941 г., Чаткальского 1946 г., Хаитского 1949 г. - в Юго-Западном Тянь-Шане, оконтуренные полосой 9-ти, 8-ми и 7-балльной интенсивностью сотрясений. Отмечается слияние 7-балльной интенсивности сотрясений Беловодского 1885 г. и Суусамырского 1992 г. землетрясений, что может

указывать на присутствие здесь вероятно скрытого разлома и потенциальную возможность возникновения сейсмических событий от 6,5 до 7-ми баллов.

После Каджисайского землетрясения 2014 г., произошло расширение зоны 6,5-балльной интенсивности. Возможно, в течение ближайших несколько лет здесь может произойти слияние этой зоны с зоной такой же интенсивности протягивающейся с юга от Гиссаро-Кокшаальской сейсмоактивной зоны в северном и северо-западном направлениях. Наиболее ярко слияние зон интенсивность 7 и 7,5- баллов выражено в Текесской линеаментной зоне Северо-Восточного Тянь-Шаня, где по геоморфологическим, геодезическим и геофизическим данным выделен скрытый Текес-Сарыджазской глубинный разлом северо-западного направления в диапазоне широт $41{,}70^0$-$43{,}30^0$N и долгот $78{,}25^0$-$79{,}50^0$E. [12].

Трехмерная модель сводных изосейст исторических и современных (по декабрь 2014 г.) землетрясений с M≥4,6 и интенсивностью от $\mathbf{I_6}$ до $\mathbf{I_{10\text{-}11}}$ баллов (рис. 4), наиболее четко отражает районы с различной интенсивностью сотрясений, выделяя при этом наиболее интенсивные очаговые области произошедших сильных землетрясений и районы слияния зон одной интенсивности (например – 7-балльной интенсивности сотрясений Беловодского 1885 г. и Суусамырского 1992 г. землетрясений). Привлечение в созданную базу данных других геофизических полей, позволяет детализировать любые районы сейсмоактивных зон и обосновать определяющие процессы, происходящие в конкретном районе зоны на разных глубинах.

Работа выполнена в рамках исследований по проекту МНТЦ KR - 2011

Литература

1. Чедия О.К. Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня. – Фрунзе: Илим, 1986. – 314 с.
2. Кнауф В.И., Миколайчук А.В., Нурманбетов К. и др. Геологическая среда возникновения землетрясений в Киргизии. – Фрунзе: Илим, 1985. – 87 с.
3. Абдрахматов К.Е., Фролова А.Г., Джанузаков К.Д., Погребной В.Н. Карта сейсмического районирования территории Кыргызской Республики (масштаб 1: 1 000 000). Бишкек, 2012.
4. Джанузаков К.Дж., Омуралиев М., Омуралиева А., Ильясов Б.И., Гребенникова В.В. Сильные землетрясения Тянь-Шаня (в пределах территории Кыргызстана и прилегающих районов стран Центральной Азии). – Бишкек: Илим, 2003. – 215 с.
5. Мамыров Э. Землетрясения Тянь-Шаня: магнитуда, сейсмический момент и энергетический класс. Бишкек: Инсанат, 2012. – 234 с.
6. Гребенникова В.В. «Модификация карты по оценке интенсивности сотрясений вследствие сильных исторических и современных землетрясений» (рукопись исследования). Кыргызпатент. Аторское свидетельство № 2462 от 28 октября 2014 г.
7. Гребенникова В.В. «Сводные карты изосейст исторических и современных землетрясений с M ≥ 4,6 с интенсивностью сейсмических сотрясений от I=6 до I=10-11 баллов». Кыргызпатент. Аторское свидетельство № 2463 от 28 октября 2014 г.
8. Каталог землетрясений Института сейсмологии Национальной Академии Наук Кыргызской Республики.
9. Catalogue of Earthquakes in Tianshan Area. Inland earthquake, v.11, supplement June 1997. Chief Editor Zhu Lingren, Urunqi, 1997. – 183 p.
10. Лемзин И.Н. Разломы Кыргызской части Тянь-Шаня. Бишкек: Илим, 2005. – 59 с.
11. Гребенникова В.В., Фортуна А.Б. Каджисайское землетрясение 14 ноября 2014 года // Мониторинг и прогноз возможной активизации чрезвычайных ситуаций на территории Кыргызской Республики (изд. 12, с изменениями и дополнениями). – Б.: МЧС КР. 2015. – С. 623-637.
12. Абдрахматов К.Е., Погребной В.Н., Гребенникова В.В., Волкова Т.Л. Геолого-тектонические и геофизические особенности Текес-Сарыджазского секущего (скрытого) глубинного разлома // Наука и новые технологии. – Бишкек. – 2012. – № 6. – С. 62-72.

УДК 550.21

ДЕТАЛЬНОЕ СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

А.Н. Гуляев, *usc_alex@mail.ru*
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. С использованием данных о наблюденной сейсмичности Урала за период 1788-2015 г.г., а так же с использованием представлений о геолого-тектонической позиции эпицентров ощутимых уральских землетрясений выполнено детальное сейсмическое районирование центральной части Уральского региона. В пределах Среднего Урала и прилегающих к нему частей Северного и Южного Урала выделена область возможных сейсмических сотрясений силой от 5 и 6 баллов до 7 баллов по шкале MSK-64, приуроченная к пограничной зоне Камско-Башкирского мегасвода Восточно-Европейской платформы и новейшего Уральского орогена.

DETAL SEISMIC ZONING OF THE CENTRAL PART URALS REGION

A.N. Gulyaev, *usc_alex@mail.ru*
Federals state budget Institute of geophysics in Y.P. Bulashevich name of Ural branch of Russian academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. By using data about observated seismicity of the Urals at the period 1788-2015 y.y. and by using date about geology-tectonics positions of Urals earthquakes epicentres detal seismic zoning of central part Urals region are realize. At the Middle Urals and adjunced parts of Nothern and Southern Urals the area possible seismic intensity of 5-6 from 7 balls by MSK scale are distinguished. This area occur at the boundary of the Kama-Bashkir megavault of the East Europe platform and the Urals neotectonic belt.

Урал, располагается **за пределами** современных трансконтинентальных сейсмоактивных зон, в которых локализованы очаги разрушительных землетрясений с магнитудой 6,0 и более и силой сотрясения в эпицентрах 7-8 баллов по шкале MSK-64 и более (рис.1). Тем не менее, на Урале отмечаются редко происходящие ощутимые землетрясения силой от 3-4 до 5-6 баллов по шкале MSK-64, сопровождающие становление новейшего Уральского эпиплатформенного орогена на современном этапе [1,2,3,4]. За период с 1788 по 2015 г.г. в центральной части Уральского региона было отмечено порядка 43 ощутимых землетрясения силой от 3-4 до 5 – 6 баллов по шкале MSK-64 [4,5] (рис.1). Из них лишь одно Билимбаевское землетрясение 17.08.2014 г. имело силу сотрясения в эпицентре 6 баллов по шкале MSK-64. Большая часть эпицентров ощутимых Уральских землетрясений сосредоточена на Среднем Урале и прилегающих к нему частях Северного и Южного Урала преимущественно в пограничной зоне Камско-Башкирского мегасвода Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и Уральского новейшего горного пояса (рис.1). Ни севернее, ни южнее подобных областей относительно повышенной сейсмичности на Урале не имеется [3]. Очаги землетрясений, согласно [2,3], локализованы преимущественно в породах дорифейского кристаллического фундамента на глубинах от первых километров до 25 км.

В 1940 году данная Средне-Уральская область редко происходящих относительно слабых землетрясений в работе З.Г. Вейс-Ксенофонтовой и Попова В.В. [1] была выделена, как район, где возможно возникновение очагов ощутимых землетрясений с силой сотрясения в эпицентрах до 6 баллов по шкале MSK-64. Эта схема является первой схемой сейсмического районирования центральной части Уральского региона.

Позднее, в 1949 г. Средний Урал и прилегающие к нему части Северного и Южного Урала выделялась на первой карте сейсморайонирования СССР, как район возможных

пятибалльных сейсмических сотрясений [8]. На карте сейсморайонирования СССР 1978 года СР-78 Средний Урал как потенциально сеймичная область выделен не был, несмотря на то, что в работе [9], являющейся пояснением к данной карте, делается вывод, что район среднего течения р. Кама и Средний Урал (включая Свердловск) следует выделить как область возможных 6 бальных сейсмических сотрясений.

В 1997 году по результатам Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97 Средний Урал и прилегающие к нему части Южного и Северного Урала были отнесены к потенциально сейсмичным регионам, в которых при проектировании и строительстве инженерных сооружений необходимо учитывать сейсмичность [10,11]. Актуальной стала задача детального сейсмического районирования центральной части Уральского региона и оценки величины расчетной силы сейсмического воздействия на планируемые к строительству и реконструкции инженерные сооружения.

В рамках решения этой задачи нами составлена схема детального сейсморайонирования центральной части Уральского региона, (рис. 2). Схема построена с использованием совокупности имеющихся на сегодняшний момент данных о наблюденной (фактической) ощутимой сейсмичности Среднего Урала, приведенных в работах [1,2,3,4,5] и с использованием представлений о геолого- тектонической позиции Средне-Уральской области редко происходящих землетрясений.

На этой схеме (рис. 2) показана Средне-Уральская потенциально сейсмичная область, имеющая форму эллипса, вытянутого в северо-западном направлении по азимуту около 30 градусов, охватывающего территорию Среднего Урала от района г. Миасс и г. Челябинск на юге и юго-востоке до района Соликамска на северо-западе. В пределах большей части этой области величина возможной силы сейсмического воздействия оценивается от 5 баллов по шкале MSK-64 для объектов основного строительства и повышенной ответственности в плане сейсмобезопасности и до 6 баллов для особо ответственных объектов. В центральной части Средне-Уральской потенциально-сейсмичной области выделяется участок (зона), где величина возможной силы сейсмического воздействия оценивается в 6 баллов по шкале MSK-64 для объектов основного строительства и повышенной ответственности в плане сейсмобезопасности и до 7 баллов для особо ответственных объектов. (рис.2). В пределах нее локализованы эпицентры наиболее сильных уже произошедших в прошлом землетрясений Среднего Урала силой в 5 - 6 баллов по шкале MSK-64, магнитуда которых, согласно [2], оценивается как порядка 4,0-5,0.

Сейсмогрунтовые условия в пределах Средне-Уральской потенциально сейсмичной области в целом благоприятные и характеризуются преимущественным развитием скальных грунтов первой категории по сейсмическим свойствам по классификации СН и П II -7-81*, представленных палеозойскими и допалеозойскими горными породами. Эти грунты перекрыты неравномерной мощности (от 0,0 м до 10-15 м и более) чехлом коры выветривания, четвертичных и техногенных отложений, которые по своим физико-механическим свойствам могут быть отнесены к грунтам второй категрии. Опыт инструментальных сейсмических наблюдений на Среднем Урале свидетельствует о том, что приращения силы сейсмического воздействия на земной поверхности в пределах региона в зависимости от грунтовых условий небольшие и составляют в основном менее 0,5 балла (0,2-0,4 балла) по шкале MSK-64. Приведенная в настоящей работе схема сейсмического районирования центральной части Уральского региона, построенная с использованием данных о наблюденных сейсмических сотрясениях, отражает это обстоятельство. Эту схему рекомендуется использовать для оценки величины расчетной силы сейсмического воздействия на планируемые к строительству инженерные сооружения.

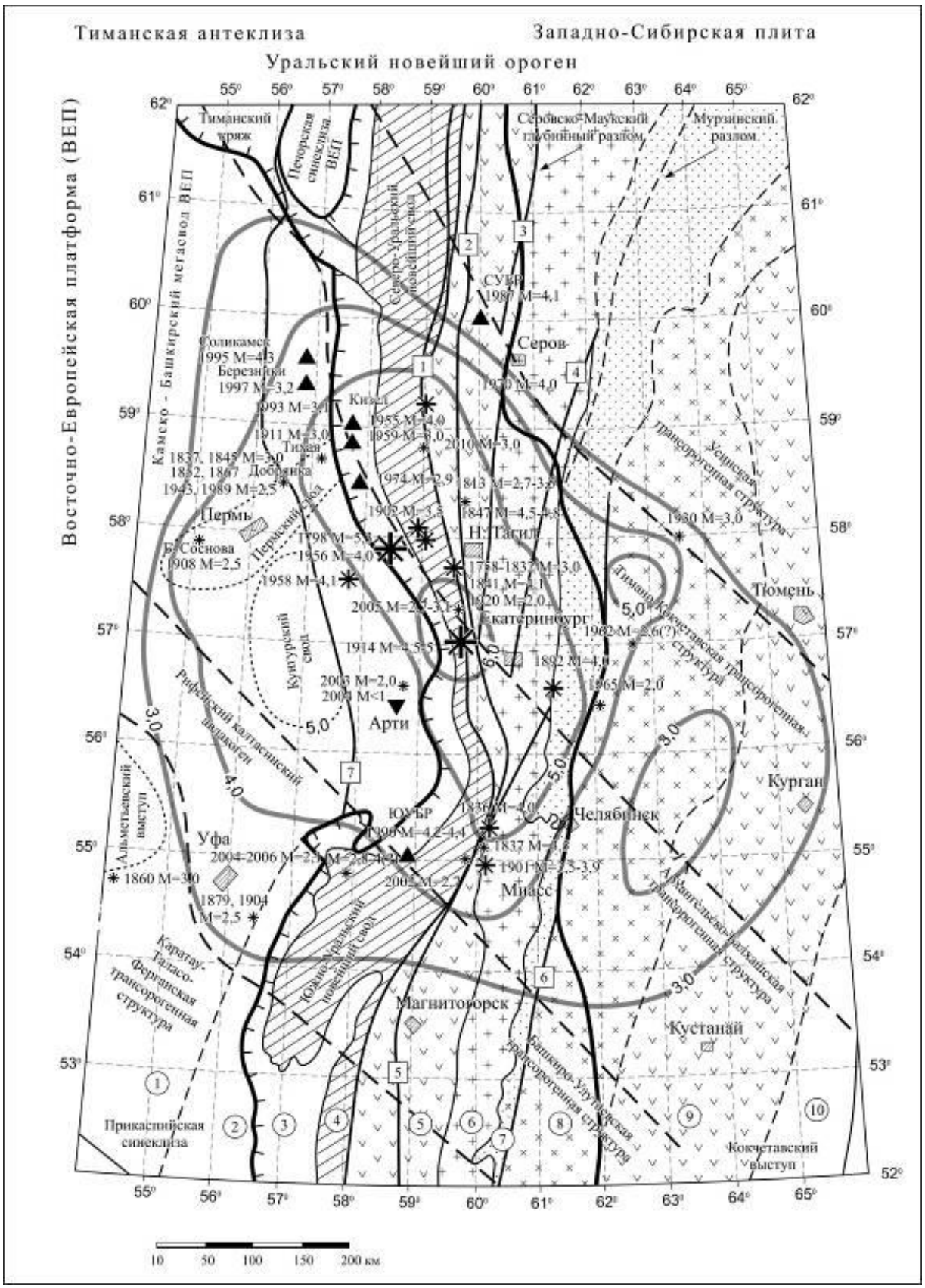


Рис. 1. Схема изолиний (изосейст) наибольших наблюденных сейсмических сотрясений в баллах шкалы MSK-64 в центральной части Уральского региона за период 1788-2015 г.г., совмещенной с тектонической картой Урала под редакцией Соболева И.Д. *Составил Гуляев А.Н., Институт геофизики Уро РАН, 2012 г., компьютерная графика Михайловой Н.В.*

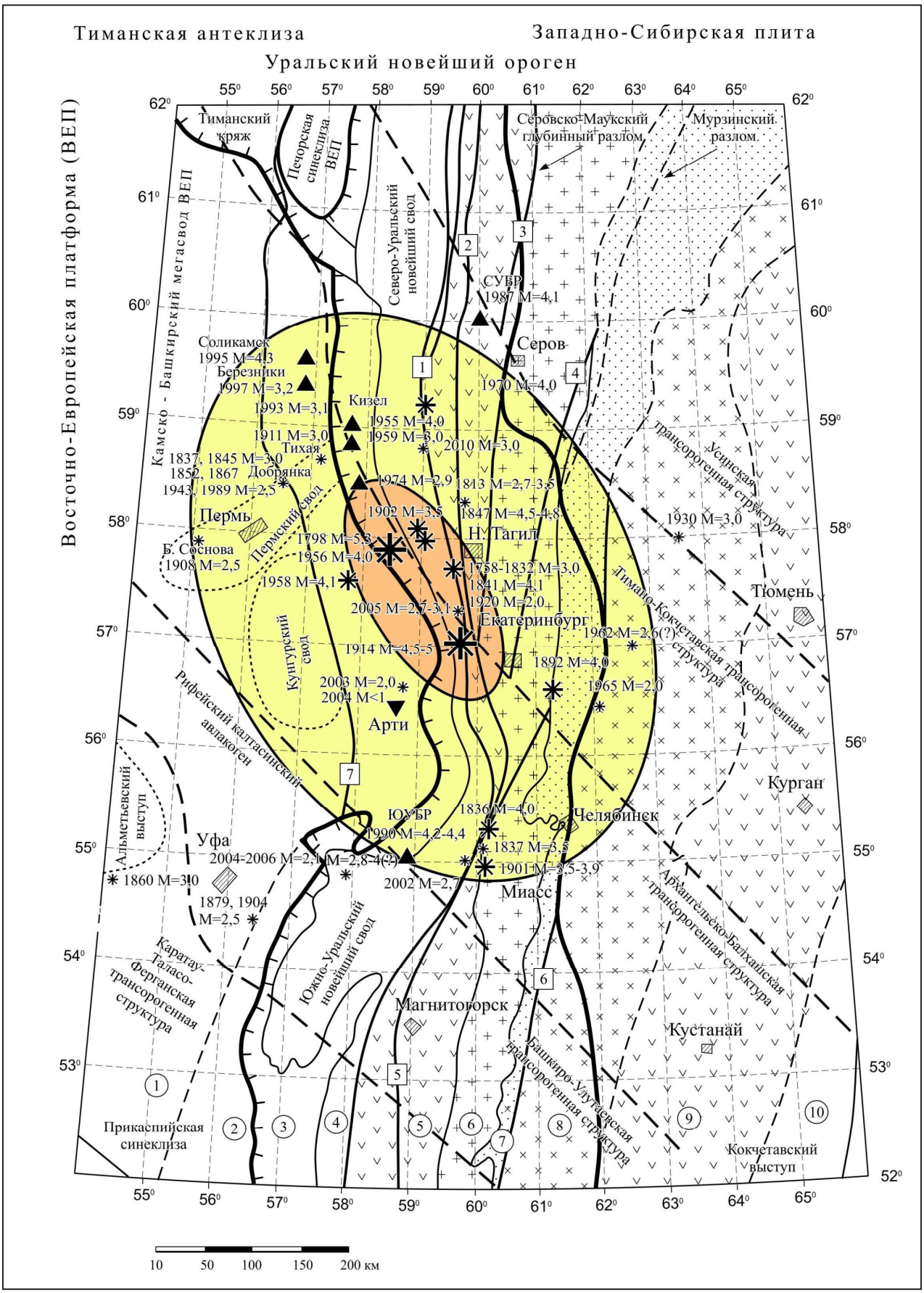


Рис. 2. Схема детального сейсмического районирования центральной части Уральского региона. *Составил Гуляев А.Н., Институт геофизики УрО РАН, 2015 г. Компьютерная графика Михайловой Н.В.*

Условные обозначения к рис.1 и 2:

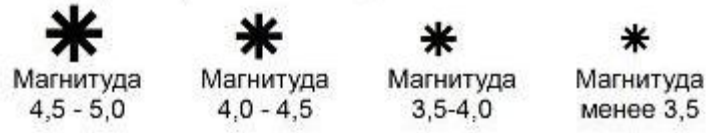
Цифрами в кружках *обозначены: 1- Восточно-Европейская платформа (ВЕП), 2- Предуральский прогиб, 3 – Западно-Уральская внешняя зона складчатости и надвигов, 4 – Центрально-Уральское поднятие, 5 – Тагило- Магнитогорский прогиб, 6 – Восточно-Уральское поднятие, 7 – Восточно-Уральский прогиб, 8 –Зауральское поднятие, 9 – Тюменско-Кустанайский прогиб, 10- Тобольско-Кушмурнское поднятие .*

Цифрами в прямоугольниках *обозначены наиболее крупные* ***разломы****:*

1 – Главный Уральский, 2- Турьинский, 3 – Серовско-Маукский, 4 – Мурзинский (Зауральский, Свердловский), 5 – Магнитогорский (Мелентьевско- Илимбаевский), 6 – Челябинский, 7 – Красноуфимский.

Черной сплошной утолщенной линией *показаны контуры «обнаженного» Урала (новейшего Уральского орогена).*

Звездочками *показаны предполагаемые места эпицентров ощутимых землетрясений. Размер звездочки прямо пропорционален магнитуде события.*



Черными треугольниками вершиной вверх *показаны места сильных горных ударов и природно-техногенных землетрясений на горно-рудных предприятиях.*

Треугольником вершиной вниз *обозначена геофизическая обсерватория «Арти» Института геофизики УрО РАН*

Коричневым (темно-серым в черно-белой версии) цветом показана область, в пределах которой величина расчетной силы сейсмического воздействия оценивается:

а) на объекты **основного (массового) строительства и повышенной ответственности** в плане сейсмобезопасности в **6 баллов** по шкале MSK-64. Пиковые ускорения движения грунта при этом оцениваются в 50 см/с^2 по шкале MSK-64 и в 60 см/с^2 по шкале SHA -97;

б) на **особо ответственные объекты** в **7 баллов** по шкале MSK-64. Пиковые ускорения движения грунта при этом оцениваются в 100 см/с^2 по шкале MSK-64 и в 129 см/с^2 по шкале SHA -97.

Желтым (светло-серым в черно-белой версии) цветом показана область, в пределах которой величина расчетной силы сейсмического воздействия оценивается:

а) на объекты **основного (массового) строительства и повышенной ответственности** в плане сейсмобезопасности в **5 баллов** по шкале MSK-64. Пиковые ускорения движения грунта при этом оцениваются в 25 см/с^2 по шкале MSK-64 и в 28 см/с^2 по шкале SHA -97;

б) на **особо ответственные объекты** в **6 баллов** по шкале MSK-64. Пиковые ускорения движения грунта при этом оцениваются в 50 см/с^2 по шкале MSK-64 и в 60 см/с^2 по шкале SHA -97.

Библиография

1. *Вейс-Ксенофонтова З.Г., Попов В.В.* К вопросу о сейсмической характеристике Урала. М, Издательство АН СССР, 1940, 12 с. (Труды Сейсмологического института АН СССР, № 104).

2. *Степанов В.В., Годзиковская А.А., Ломакин В.С., Прибылова Н.Е., Мокрушина Н.Г., Силина И.К., Кусонский О.А., Митенкова Н.В.* Землетрясения Урала и сильнейшие землетрясения прилегающих территорий Западной Сибири и Восточно-Европейской платформы, ЦСГНЭО, Москва, 2002, 135 с.

3. *Кашубин С.Н., Дружинин В.С., Гуляев А.Н., Кусонский О.А., Ломакин В.С., Маловичко А.А., Никитин С.Н., Парыгин Г.Н., Рыжий Б.П., Уткин В.И.* Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона. Екатеринбург, УрО РАН, 2001, 124 с.

4. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы, книга 1 Землетрясения под редакцией Н.В.Шарова, А.А.Маловичко, Ю.К.Щукина, Петрозаводск, 2007, 380 с.
5. *Гуляев А.Н, Осипова А.Ю.* Сейсмичность Среднего Урала и строительство в регионе// Архитектон, известия ВУЗов, http:// archvuz.ru/2013_2/20.
6. Новейшая тектоника Урала, том V под редакцией *Сигова А.П. , Сигова В.А.*, издание Саратовского университета, 1975, 104 с.
7. Геология СССР, том XII, часть 1, книга 2, М., Недра, 1969, 304 с.
8. *Пучков В*.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении), Уфа, 2010, 279 с.
9. *Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П.* Элементы сейсмологии и сейсмометрии, Москва, Ленинград, 1949, 343 с.
10. Сейсмическое районирование территории СССР, ответственные редакторы В.И.Бунэ и Г.П.Горшков, М., Наука, 1980, 306 с.
11. Комплект карт Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97 масштаб 1:8000 000, объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. Главные редакторы Комплекта карт ОСР-97 академик РАН В.Н.Стахов, член-корреспондент АН Республики Узбекистан, профессор В.И. Уломов, Москва, 1999, 56 с.
12. Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмичных районах, СНиП II-7-81*, Госстрой России, Москва, 2000.
13. Технический регламент проведения работ по общему сейсмическому районированию территории Российской Федерации (ОСР). Свод правил. Часть 1. Основные положения. Концепция и методические принципы. Часть 2. Приложения к своду правил ОСР, Москва, 2010, 160 с.

УДК 550.21

СЕЙСМИЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

***А.Н. Гуляев**, usc_alex@mail.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. В пределах центральной части Уральского региона отмечаются редко происходящие ощутимые природные землетрясения интенсивностью в эпицентрах от 3,0-4,0 до 5,0-6,0 баллов по шкале MSK-64, сопровождающие становление новейшего Уральского орогена на современном этапе. Эпицентры большей части ощутимых землетрясений, в том числе, наиболее сильных землетрясений региона сосредоточены в пределах Средне-Уральского сейсмодомена, охватывающего участок пограничной зоны Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и Уральского горно-складчатого пояса. Инженерно-сейсмические условия в центральной части Уральского региона можно оценить как благоприятные и безопасные для большей части инженерных сооружений.

THE SEISMICITY OF THE CENTRAL PART URALS REGION

***A.N. Gulyaev**, usc_alex@mail.ru*

Federals state budget Institute of geophysics in Y.P. Bulashevich name of Ural branch of Russian academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. At the central part of the Urals region as rare sensitive natural earthquakes intensity from 3,0-4,0 to 5,0 - 6,0 balls by MSK -64 scale are occur. Earthquakes accompany of the recent Urals orogen formation at the modern age. Epicenters of the more part sesesitive earthquakes including more strong events are located at the Middle Urals seismodomen area, which envelop the district of the boundary zone between East –European platform and the Urals mountains. The seismo-ingineering conditions at the central part of the Urals region may be estimate as favourable and safe for more part of buildings.

Урал располагается за пределами трансконтинентальных сейсмоактивных зон, в которых локализованы эпицентры разрушительных землетрясений. В то же время, на Урале отмечаются редко происходящие ощутимые землетрясения силой от 3-4 до 5-6 баллов по шкале MSK-64, сопровождающие становление на современном этапе новейшего Уральского орогена, возникшего, согласно [1,2,3], в течение последних приблизительно 30 млн. лет в западной части разрушенной процессами денудации позднепалеозойской Уральской горно-складчатой системы.

Согласно данным, приведенным в работах [4,5,6,7] за период 1788 - 2015 г.г. в пределах центральной части Уральского региона было отмечено порядка 43 ощутимых землетрясения силой от 3,0-4,0 до 5,0-6,5 баллов по шкале MSK-64 в эпицентрах (рис.2). Большая часть эпицентров ощутимых землетрясений Уральского региона сосредоточена в пределах Среднего Урала и примыкающих к нему частях Северного и Южного Урала (рис.1,2). Данная область в соответствии с терминологией, предложенной в работе [8], нами была названа Средне-Уральским сейсмодомоеном [9]. Сейсмодомен охватывает пограничную зону Камско-Башкирского мегасвода Восточно-Еврпейской платформы (ВЕП) и субмеридионального Уральского горно-складчатого пояса и может рассматриваться как зона возможного возникновения очагов ощутимых землетрясений (зона ВОЗ) в будущем (рис. 1).

Очаги большей части ощутимых землетрясений, согласно оценкам, приведенным в работах [5,6], локализованы на глубинах от первых километров до глубин порядка 25 км, преимущественно в породах дорифейского кристаллического фундамента. В плане эпицентры наиболее сильных землетрясений с магнитудой 4,5-5,0 и силой сотрясения порядка 6,0 баллов по шкале MSK-64 тяготеют к осевой зоне Средне-Уральского сейсмодомена, представленной участком границы между Камско-Башкирским мегасводом ВЕП и расположенной к востоку от него областью, названной в работе [3] Казахстанским

палеоконтинентом. Граница проявлена в наблюденном магнитном поле в виде условной субмеридиональной линии, разделяющей области с различным характером поля и преобладающим направлением аномалий. Она соответствует осевой части Центрально-Уральского поднятия, являющегося осевой зоной новейшего Уральского орогена.

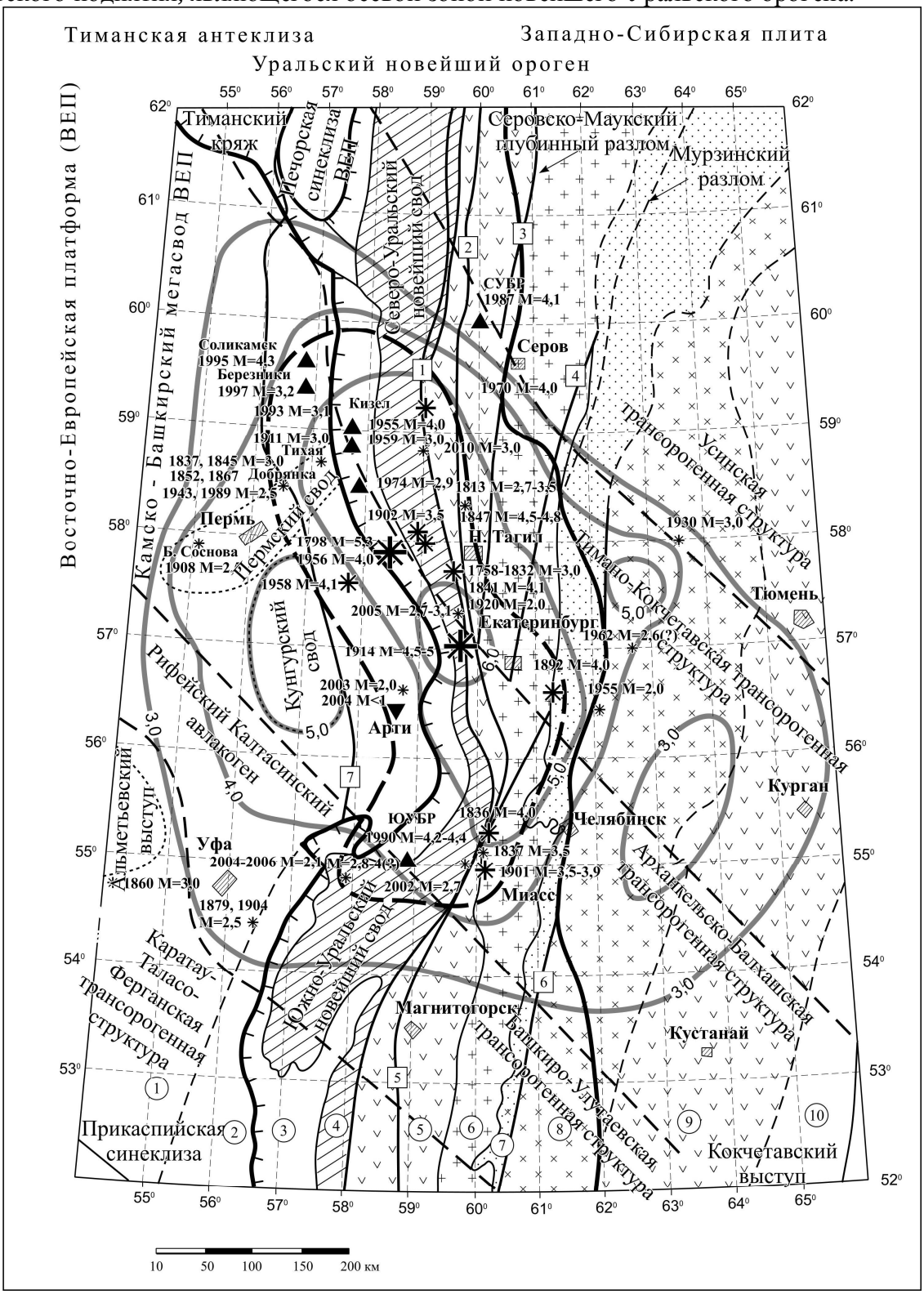


Рис. 1. Схема изолиний (изосейст) наибольших наблюденных сейсмических сотрясений в баллах шкалы MSK-64 в центральной части Уральского региона за период 1788-2010 г.г., совмещенная с фрагментом тектонической карты Урала под редакцией Соболева И.Д. *Составил Гуляев А.Н., Институт геофизики Уро РАН, 2012 г. Компьютерная графика Михайловой Н.В.*

Условные обозначения к рис.1:

Цифрами в кружках *обозначены: 1- Восточно-Европейская платформа (ВЕП), 2- Предуральский прогиб, 3 – Западно-Уральская внешняя зона складчатости и надвигов, 4 – Центрально-Уральское поднятие, 5 – Тагило- Магнитогорский прогиб, 6 – Восточно-Уральское поднятие, 7 – Восточно-Уральский прогиб, 8 –Зауральское поднятие, 9 – Тюменско-Кустанайский прогиб, 10- Тобольско-Кушмурнское поднятие .*

Цифрами в прямоугольниках *обозначены наиболее крупные разломы:*

1 – Главный Уральский, 2- Турьинский, 3 – Серовско-Маукский, 4 – Мурзинский (Зауральский, Свердловский), 5 – Магнитогорский (Мелентьевско- Илимбаевский), 6 –

Черной сплошной линией *показаны контуры «обнаженного» Урала.*

Черной утолщенной пунктирной линией *показаны контуры Средне-Уральского сейсмодомена.*

Черными звездочками *показаны предполагаемые места эпицентров ощутимых землетрясений. Размер звездочки прямо пропорционален магнитуде события. Цифрами показаны даты и магнитуды событий.*

Черными треугольниками вершиной вверх *показаны места сильных горных ударов и природно-техногенных землетрясений на горно-рудных предприятиях.*

Черным треугольником вершиной вниз *показана геофизическая обсерватория «Арти» Института геофизики УрО РАН.*

Утолщенными серыми линиями с цифрами *показаны изосейсты наибольших наблюденных сейсмических сотрясений за период 1788-2015 г.г. в баллах шкалы MSK-64. Цифры на изосейстах соответствуют баллам шкалы MSK-64.*

Природа наиболее сильных землетрясений центральной части Уральского региона оценивается как тектоническая [4,5,6,7]. Как правило, такие события имеют глубокие очаги, локализованные на глубинах более 20-25 км. Во время таких землетрясений, например 23.05.1798 г. и Билимбаевского 17.08.1914 г. ощутимыми сотрясениями охватывается значительная часть территории региона, практически весь Средний Урал и прилегающие к нему части Северного и Южного Урала. Относительно менее сильные землетрясения с неглубокими (приповерхностными) очагами в районе г. Добрянки, д.Тихой, г.Кунгур могут иметь карстово-провальный характер [5,6]. На территориях действующих горно-рудных предприятий иногда отмечаются сильные горные удары и ощутимые природно-тектонические землетрясения, обусловленные обрушеним (осадкой) подработанных подземными горными выработками пространств [6,10] Эти явления вследствие небольшой (от первых десятков до сотен метров) глубины очагов представляют неблагоприятность преимущественно для персонала рудников, но не ближайших населенных пунктов.

За период 1788-2015 г.г., магнитуды Уральских землетрясений (рис. 2) колебались относительно их среднего значения порядка 3,0, а сила сотрясения (интенсивность) в эпицентрах - около значения в 4,0 балла по шкале MSK-64. На фоне средних значений вышеупомянутых параметров выделяются отдельные события, магнитуда которых оценивается как порядка 4,0-5,0, и интенсивность сотрясений в эпицентрах как порядка в 5,0-6,0 баллов по шкале MSK-64. При этом наиболее сильные землетрясения, например, самое сильное за время инструментальных сейсмологических наблюдений Билимбаевское землетрясение 17.08.1914 г. и землетрясение 21.02.1970 г. в окрестностях пос. Павда, произошли в периоды значительных вариаций скорости вращения Земли (рис.2).

В целом сейсмическую активность недр центральной части Уральского региона можно оценить как низкую, предположительно сопряженную с низкими амплитудами деформации земной коры Урала в новейшее время, оценивающимися, согласно [1,2], как порядка 225-350 м на Среднем Урале и до300- 400 м на Северном и до 400-700м Южном Урале. По аналогии с северными предгорьями Тянь-Шаня, где амплитуда новейших деформаций земной коры менее 500 м [12], весь Урал может быть отнесен к области тектонической стабилизации с редко возникающими очагами землетрясений с интенсивностью сотрясения в эпицентральных зонах, не превышающих 6,0-6,5 баллов по шкале MSK-64. Имеющиеся на сегодняшний день данные о сейсмичности Урала вполне согласуются с этим положением.

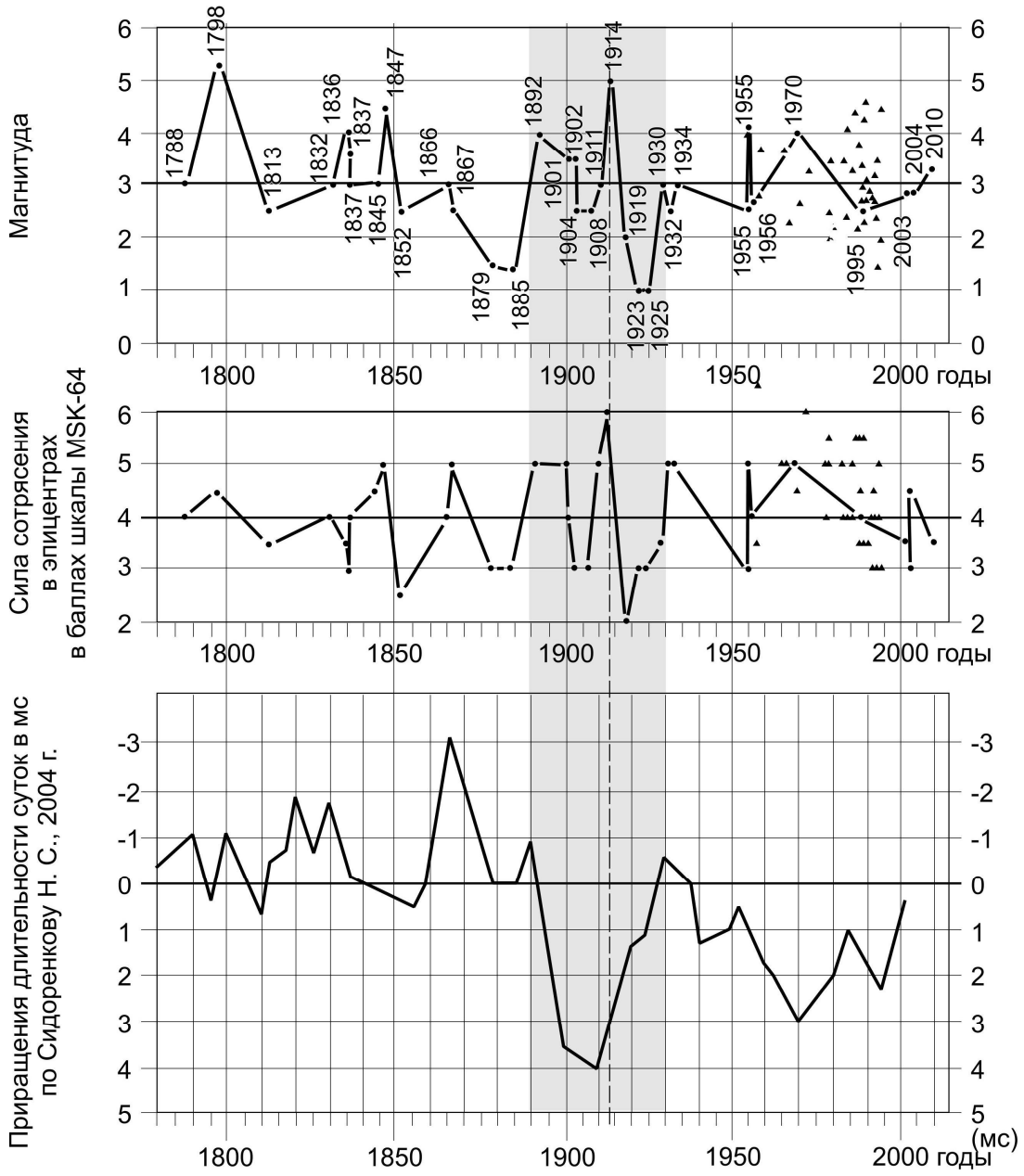


Рис. 2. Графики вариаций во времени магнитуды (верхний график) и силы (интенсивности) ощутимых землетрясений в центральной части Урала (средний график) за период 1788-2015 г. в сопоставлении с графиком приращений длительности суток (приращений скорости вращения Земли) по Сидоренкову Н.С., 2004 г. (нижний график). *Составил Гуляев А.Н., Институт геофизики УрО РАН, 2005-2015 г.г. Компьютерная графика Михайловой Н.В.*

Точками показаны параметры для случаев природных землетрясений, черными треугольниками – параметры для сильных горных ударов и природно-техногенных землетрясений на горнорудных предприятиях.

Цифрами над верхним графиком показаны годы, когда были отмечены природные ощутимые землетрясения.

В целом по результатам анализа данных о сейсмичности, геолого-тектоническом строении инженерно-сейсмические условия в центральной части Уральского региона могут быть оценены, как благоприятные и безопасные для большей части инженерных сооружений. Такие условия обусловлены:

1. Низкой сейсмической активностью земной коры региона, проявляющейся в том, что ощутимые природные землетрясения здесь происходят редко и сила их не превышает 5,0-6,0 баллов по шкале MSK-64. Согласно графика повторяемости (рис. 3), землетрясения с магнитудой 4,5-5,0 и силой сотрясения в эпицентре в 6,0-6,5 баллов по шкале MSK-64 здесь могут происходить приблизительно один раз в 116-120 лет. Экстраполяция графика повторяемости в область больших магнитуд позволяет предположить, что определенные нормативным документом [11] наиболее сильные для Урала землетрясения с магнитудой 5,5 и силой сотрясения в эпицентре порядка 7,0 баллов по шкале MSK-64 теоретически могут происходить приблизительно один раз в 1000 лет.

2. Благоприятными сейсмо-грунтовыми условиями, обусловленными развитием в пределах обнаженного Урала, где сосредоточена большая часть эпицентров ощутимых землетрясений, преимущественно скальных грунтов первой наиболее благоприятной в инженерно-сейсмическом отношении категории по сейсмическим свойствам по классификации СНиП II -7-81*.

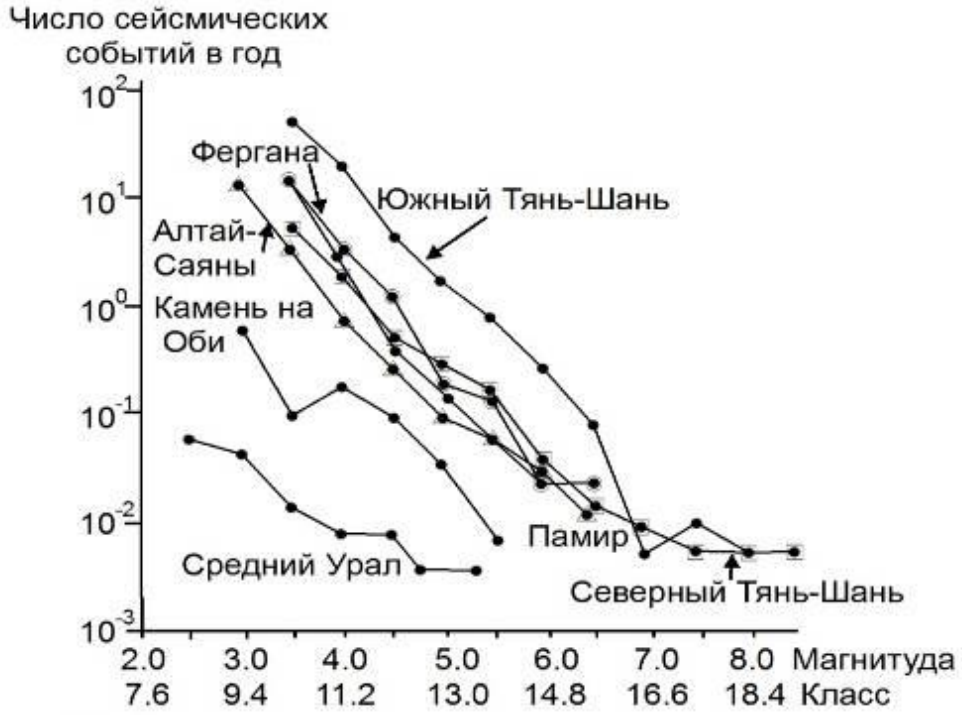


Рис. 3. График повторяемости землетрясений Среднего Урала за период 1788-2015 г.г. в сопоставлении с подобными графиками других сейсмичных регионов. *Составил Гуляев А.Н., Институт геофизики УрО РАН, 2005- 2013 г.г. Компьютерная графика Осиповой А.Ю.*

Литература

1. Геология СССР, том XII, часть 1, книга 2, М., Недра, 1969, 304 с.
2. Новейшая тектоника Урала, том V под редакцией *Сигова А.П , Сигова В.А.*, издание Саратовского университета, 1975, 104 с.
3. *Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении), Уфа, 2010, 279 с.
4. *Вейс-Ксенофонтова З.Г., Попов В.В.* К вопросу о сейсмической характеристике Урала. М, Издательство АН СССР, 1940, 12 с. (Труды Сейсмологического института АН СССР, № 104).
5. *Степанов В.В., Годзиковская А.А., Ломакин В.С., Прибылова Н.Е., Мокрушина Н.Г., Силина И.К., Кусонский О.А., Митенкова Н.В.* Землетрясения Урала и сильнейшие землетрясения прилегающих территорий Западной Сибири и Восточно-Европейской платформы, ЦСГНЭО, Москва, 2002, 135 с.

6. *Кашубин С.Н., Дружинин В.С., Гуляев А.Н., Кусонский О.А., Ломакин В.С., Маловичко А.А., Никитин С.Н., Парыгин Г.Н., Рыжий Б.П., Уткин В.И.* Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона. Екатеринбург, УрО РАН, 2001, 124 с.
7. *Кусонский О.А*. Геофизические обсерваторские исследования на Урале, Екатеринбург, 2012, 277 с.
8. Технический регламент проведения работ по общему сейсмическому районированию территории Российской Федерации(ОСР). Свод правил. Часть 1. Основные положения. Концепция и методические принципы. Часть 2. Приложения к своду правил ОСР, Москва, 2010, 160 с.
9. *Гуляев А.Н, Осипова А.Ю.* Сейсмичность Среднего Урала и строительство в регионе// Архитектон, известия ВУЗов, http:// archvuz.ru/2013_2/20.
10. *Сашурин А*.Д. Роль современной геодинамики в развитии природно-техногенных катастроф в сфере недропользования // Геомеханика в горном деле, доклады научно-технической конференции, Екатеринбург, 2009, С. 158-164.
11. Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно – и радиационно опасных объектов на основании геодинамических данных РБ-019-01, Москва, 2001.
12. Сейсмическое районирование территории СССР, ответственные редакторы В.И.Бунэ и Г.П.Горшков, М., Наука, 1980, 306 с.
13. Комплект карт Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97 масштаб 1:8000 000, объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. Главные редакторы Комплекта карт ОСР-97 академик РАН В.Н.Страхов, член-корреспондент АН Республики Узбекистан, профессор В.И. Уломов, Москва, 1999, 56 с.

УДК 550.36:551.583

НОВАЯ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ТЕРМОМЕТРИИ СКВАЖИНЫ HUNT WELL (КАНАДА)

Д.Ю. Демежко[1], А.А. Горностаева[1], Я. Майорович[2], Я. Шафанда[3]

1- Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия, ddem54@inbox.ru

2– Университет Альберты, Эдмонтон, Канада

3– Институт геофизики Чешской академии наук, Прага, Чехия

Using previously published results of' temperature log of the 2363 meter-deep borehole Hunt well (Alberta, Canada) and the results of its previous interpretation, the new reconstructions of ground surface temperature (GST) and surface heat flux (SHF) histories for the last 40 kyr have been obtained. Two ways of the timescale adjustment of geothermal reconstructions are discussed, namely the traditional method based on the a priori data on thermal diffusivity value, and the alternative one including the orbital tuning of the surface heat flux and Earth's insolation changes. It is shown that the second approach provides better agreement between geothermal reconstructions and proxy evidence of deglaciation chronology in the studied region.

Реконструкции климатических изменений прошлого, основанные на анализе данных скважинной термометрии, играют все более важную роль в палеоклиматических исследованиях. Особый интерес для понимания климатической истории Земли представляют геотермические реконструкции длительностью в несколько десятков тысяч лет. В этот период (15–10 тыс. л.н.) произошло глобальное климатическое событие – последняя ледниковая эпоха плейстоцена сменилась современным межледниковьем – голоценом. До недавнего времени основное внимание уделялось восстановлению температурной истории земной поверхности (GST – ground surface temperature). В последние годы геотермические данные все чаще используют для оценки энергетики климатических процессов [1-7]. Энергетическая характеристика климата выражается либо величиной аномального теплового потока через земную поверхность (SHF – surface heat flux) [Вт/м^2], либо изменением теплосодержания литосферы за определенный период [Дж или Дж/м^2].

В докладе приводятся результаты новых геотермических реконструкции температурной и тепловой историй земной поверхности в провинции Альберта (Канада) за последние 40 тыс лет, обсуждается влияние Лаврентийского ледникового щита на тепловой режим земной поверхности.

Скважина Hunt Well была пробурена в 2003 г до глубины 2363 м. Она расположена в пределах северо-западного крыла Западно-Канадского осадочного бассейна в 4 км к востоку от Форта Мак-Мюррей. Скважина вскрыла 543 м фанерозойских осадочных пород и на 1820 м углубилась в докембрийские граниты кристаллического фундамента (Walsh 2013;). Ранее проведенными геотермическими исследованиями [9, 10] были установлены распределения температуры, теплопроводности и теплогенерации пород с глубиной. Первая температурная реконструкция [11] была выполнена по методике *FSI* (*Functional Space Inversion*) [12]. В результате была получена весьма сглаженная температурная история земной поверхности за последние 100 тыс. лет и уточнена модель стационарного, не возмущенного влиянием палеоклимата, распределения температуры. Именно это распределение мы использовали в качестве исходных данных для дальнейшей интерпретации. Более детальная температурная история для последних 30 тыс. лет была реконструирована с помощью алгоритма, разработанного в Институте геофизики УрО РАН [13]. Тепловая история (история изменения теплового потока через земную поверхность) получена путем трансформации температурной с помощью алгоритма, также разработанного авторами [7, 14]. Обе истории – температурная (GST) и тепловая (SHF) - приведены на рис. 1а. Здесь же для сравнения показаны изменения среднегодовой инсоляции (Ins) на 60° с.ш. [15].

Дальнейшая палеоклиматическая интерпретация основывалась на уточнении временной шкалы геотермических реконструкций и сопоставлении двух вариантов шкалы, исходного и уточненного, с независимыми палеоклиматическими свидетельствами. Ранее мы

предложили рассматривать среднегодовую инсоляцию Северного полушария, рассчитанную по данным об изменениях элементов земной орбиты [15], для корректировки хронологии геотермических реконструкций [4, 6, 7]. Такой способ широко используется для орбитальной настройки (orbital tuning) температурных реконструкций, полученных по косвенным (proxy) свидетельствам палеоклимата [16], однако нами он был впервые применен не к температурным, а к тепловым данным, что физически более корректно. Второй вариант геотермической хронологии приведен на рис. 1б. По сравнению с исходным вариантом кривая теплового потока смещена дальше в прошлое - до максимальной синхронизации с инсоляционной кривой. При этом, естественно, сместилась в прошлое и температурная кривая. Изменению временного масштаба соответствует изменение эффективной температуропроводности пород с $1.2 \cdot 10^{-6}$ м^2/с до $0.94 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

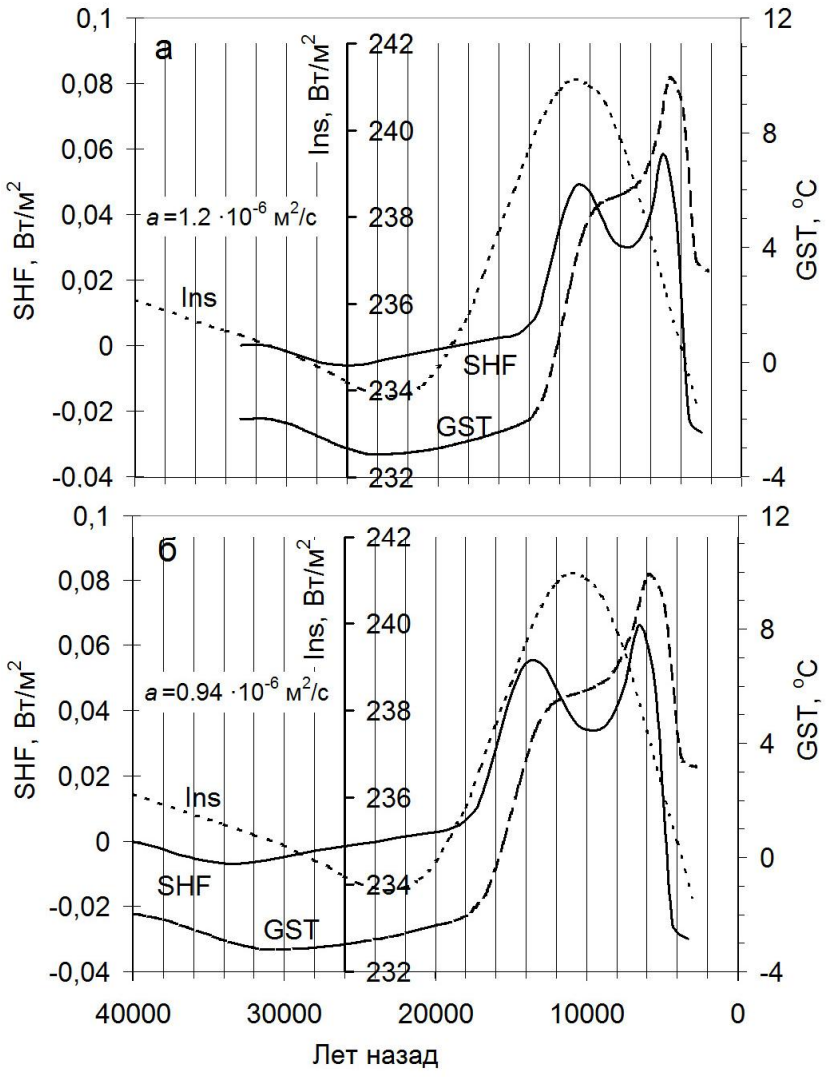


Рис. 1. Две версии временной шкалы геотермических реконструкций температуры (GST) и потока (SHF) в сравнении с изменениями среднегодовой инсоляции (Ins) на 60° с.ш.

а) Геотермическая хронология-I, соответствующая исходному значению коэффициента температуропроводности $a = 1.2 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

б) Геотермическая хронология-II, соответствующая коэффициенту эффективной температуропроводности $a = 0.94 \cdot 10^{6}$м^2/с, определенному по максимуму взаимной корреляции межу изменениями SHF и инсоляции.

Косвенные данные о дегляциации в районе скважины (тоже, впрочем, весьма противоречивые) свидетельствуют как в пользу, так и против каждого из вариантов (для определенности назовем их «хронология- I» и «хронология- II»). Так, начало дегляциации (11-13 тыс л.н. - [17, 18]) лучше согласуется с исходной хронологией, для которой резкое потепление приходится на период 10-13 тыс.л.н. Резкий рост температуры прекратился примерно 9 тыс. л.н., сменившись интервалом почти постоянной температуры +6 °С, продолжавшимся до 7 тыс. л.н. Этому интервалу соответствует и локальный минимум теплового потока. Так как все значимые события дегляциации в это время уже закончились, объяснить подобную стабилизацию достаточно сложно. Температурный максимум +10 °С

достигается ок. 4.5 тыс. л.н., уже после климатического оптимума голоцена, датируемого периодом 9–5 тыс. л.н.

Согласно хронологии-II, потепление земной поверхности началось задолго до дегляциации – ок. 17 тыс. л.н. Дегляциации района соответствует начало участка стабильных температур ок. 12 тыс. л.н. Раннее начало потепления в основании ледника можно объяснить изменением его термомеханических свойств. За период 21-14 тыс. л.н. мощность Лаврентийского щита в районе скважины уменьшилась вдвое [19, 20]. Вместе с этим, вероятно, упала и скорость вертикальной адвекции, ответственной за поддержание низких температур в основании ледника [21]. После отступления ледника температура поднялась до +6 °С, но дальнейшему повышению температуры препятствовало возникшее приледниковое озеро Мак-Мюррей. Период стабильных температур продолжался до 9 тыс. л.н. Возможно, что и после дренирования озера район скважины долгое время оставался заболоченным и осушился лишь в результате изостатического поднятия. Температура земной поверхности достигла максимума около 6 тыс. л.н., что хорошо согласуется с климатическим оптимумом голоцена.

Палеоклиматическая интерпретация геотермических данных по скважине Hunt Well показала, что тепловой режим земной поверхности в этом районе в течение последнего цикла ледниковой истории формировался под влиянием целого ряда факторов, включая орбитальные факторы (колебания инсоляции), изменение термомеханических свойств Лаврентийского ледникового щита, дегляциацию, образование приледниковых озер и их последующее осушение. Но все же главным климатообразующим фактором, вероятно, является инсоляция, которая через сложную систему обратных климатических связей определяет поведение остальных. Лучше понять этот механизм позволяет реконструкция изменений теплового потока через земную поверхность. Будучи энергетическим выражением климата, реконструируемый тепловой поток может быть непосредственно сопоставлен с другими климатическими характеристиками, имеющими размерность потока энергии, например, с инсоляцией. Процедура синхронизации изменений теплового потока через земную поверхность с изменениями инсоляции дает возможность скорректировать временную шкалу геотермических реконструкций, первоначально определенную лабораторными измерениями коэффициента температуропроводности пород.

Литература

1. *Beltrami H., Wang J., Bras R. L.* Energy balance at the Earth's surface: Heat flux history in eastern Canada //Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. № 20. P. 3385–3388.
2. *Beltrami H., Smerdon J. E., Pollack H. N., and Huang S.* Continental heat gain in the global climate system //Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 8. P. 8-1–8-3.
3. *Beltrami H.* Surface heat flux histories from inversion of geothermal data: Energy balance at the Earth's surface //J. Geophys. Res: Solid Earth (1978–2012). 2001. V. 106. № B10. P. 21979–21993.
4. *Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Tarkhanov G.V. and Esipko O.A.* 30,000 years of ground surface temperature and heat flux changes in Karelia reconstructed from borehole temperature data // Bulletin of Geography. Physical Geography Series, 2013. № 6. P. 7–25.
5. *Демежко Д.Ю., Горностаева А.А.* Реконструкция изменений теплового потока через земную поверхность на Урале по геотермическим и метеоданным //Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 4. С. 21–40.
6. *Демежко Д.Ю., Горностаева А.А.* Реконструкции долговременных изменений теплового потока через земную поверхность по данным геотермии глубоких скважин //Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 12. С. 1841–1846.
7. *Demezhko D.Y., Gornostaeva A.A.* Late Pleistocene–Holocene ground surface heat flux changes reconstructed from borehole temperature data (the Urals, Russia) //Clim. Past. 2015. V. 11. № 4. P. 647–652.

8. *Walsh N.J.* Geochemistry and geochronology of the Precambrian Basement Domains in the Vicinity of Fort McMurray, Alberta. A Geothermal Perspective, M.Sc. Thesis, University of Alberta. 2013. 194 pp.
9. *Majorowicz J., Chan J., Crowell J., et al.* The first deep heat flow determination in crystalline basement rocks beneath the Western Canadian Sedimentary Basin //Geophys. J. Int. 2014. V. 197(2). P. 731–747.
10. *Majorowicz J., Gosnold W., Gray A., et al.* Implications of post-glacial warming for northern Alberta heat flow-correcting for the underestimate of the geothermal potential // GRC Trans. 2012. V. 36 (GRC1030303).
11. *Majorowicz J., Šafanda J.* Effect of postglacial warming seen in high precision temperature log deep into the granites in NE Alberta //Int. J. Earth Sci. 2014. P. 1–9.
12. *Shen P.Y., Beck A.E.* Least Squares Inversion in Borehole Temperature Measurements in Functional Space //J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № B12. P. 19,965–19,979.
13. *Demezhko D.Yu., Shchapov V.A.* 80,000 years ground surface temperature history inferred from the temperature-depth log measured in the superdeep hole SG-4 (the Urals, Russia) //Global and Planetary Change. 2001. V. 29 (1–2). P. 219–230.
14. *Горностаева А.А.* Алгоритм расчета теплового потока через земную поверхность по данным об изменениях температуры поверхности //Уральский геофизический вестник. 2014. № 1. С. 37–45.
15. *Berger A., Loutre M.F.* Insolation values for the climate of the last 10 million of years //Quat. Sci. Rev. 1991. V. 10. № 4. P. 297–317
16. *Martinson D.G., Pisias N.G., Hays J.D., et al.* Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0–300 000 years chronostratigraphy //Quat. Res. 1987. V. 27. P. 1–30
17. *Dyke A.S.* An outline of North American deglaciation with emphasis on central and northern Canada //Quaternary glaciations: extent and chronology. 2004. V. 2. P. 373–424.
18. *Fisher T.G., Waterson N., Lowell T.V., et al.* Deglaciation ages and meltwater routing in the Fort McMurray region, northeastern Alberta and northwestern Saskatchewan, Canada //Quat. Sci. Rev. 2009. V. 28(17). P. 1608–1624.
19. *Licciardi J.M., Clark P.U., Jenson J.W., et al.* Deglaciation of a soft-edded Laurentide ice sheet //Quat. Sci. Rev. 1998. V. 17. P. 427–448.
20. *Peltier W.R.* Global glacial isostasy and the surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE //Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 2004. V. 32. P. 111–149.
21. *Demezhko D.Yu., Ryvkin D.G., Outkin V.I., et al.* Spatial distribution of Pleistocene/Holocene warming amplitudes in Northern Eurasia inferred from geothermal data //Clim. Past. 2007. V. 3. P. 559–568

УДК 550.31; 528.88

АНОМАЛЬНЫЕ ОБЛАЧНЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В НЕБЕ НАД ЯПОНИЕЙ

Л.Н. Дода[1], А.А. Малашин[2], В.Л. Натяганов[2], И.В. Степанов[1], С.А. Шопин[1]

1 – ФБГОУ ВО Тульский государственный университет, г.Тула, Россия, l.doda@mail.ru

2 – ФБГОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г.Москва, Россия, tenzor@nbmgu.ru

Показаны примеры специфических облачных структур, обнаруженных на космоснимках при мониторинге Японской зоны. Облачные структуры имеют форму близкую к окружности (кольцу). Рассмотрен возможный механизм формирования подобных структур как грибовидных течений – вихревых образований в океане и атмосфере, возникающих под действием магнитогидродинамических сил. Показан пример подобной структуры, обнаруженной перед мега-землетрясением Тохоку 11 марта 2011г.

ANOMALOUS ANNULAR CLOUD STRUCTURES IN THE SKY ABOVE JAPAN

L.N. Doda[1], A.A. Malashin[2], V.L. Natyaganov[2], I.V. Stepanov[1], S.A. Shopin[1]

1 – Tula State University, Tula, Russia, l.doda@mail.ru

2 – Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, tenzor@nbmgu.ru

Examples of specific cloud structures, revealed on satellite images during Japan zone monitoring are shown. Cloud structures have a shape similar to annular type. It is considered a possible mechanism of their formation as mushroom currents – vortical formations in the ocean and atmosphere, originating under the action of magnetic hydrodynamics forces. Example of similar structure found before mega earthquake Tohoku of 11 March 2011 is presented.

С августа 2011г. авторами проводится мониторинг Японской зоны как тестовой для отработки технологии краткосрочного прогноза землетрясений на основании эмпирической схемы краткосрочного прогноза (схемы НЦ ОМЗ) [1,2]. Главной целью мониторинга является прогнозирование и своевременное упреждение катастрофического землетрясения, которое возможно в ближайшие годы в Японской зоне согласно средне- и долгосрочным прогнозам ряда геофизиков, например [3].

При анализе космоснимков облачности над Японской зоной были обнаружены специфические облачные структуры, имеющие кольцевую форму, названные авторами аномальными кольцевыми облачными структурами (КОС). Впервые они были зафиксированы в реальном режиме времени на космоснимках от 2 мая 2013г. в зоне желоба Нанкай (рис.1) в форме полукольца с растущим диаметром D вдоль южной границы Охотской плиты вблизи Токийского залива. Динамика образования этой КОС хорошо прослеживается на космоснимках с различных спутников: Terra, Aqua, Метеор-М, MTSAT-2R.

Информация об изменении размера структуры во времени приведена в табл. 1 (с максимальным диаметром D_{max} около 350 км). Время существования КОС от зафиксированного начала формирования до рассеивания составило около 6 часов, после 03:00 структура стала быстро рассеиваться.

Таблица 1 – Изменение диаметра D кольцевой облачной структуры во времени

Время	Диаметр	Время	Диаметр
01.05.2013, 20:00	0	02.05.2013, 00:30	6/7 D_{max}
01.05.2013, 22:30	<1/3 D_{max}	02.05.2013, 01:45	9/10 D_{max}
02.05.2013, 00:00	1/3 D_{max}	02.05.2013, 02:30	D_{max} около 350 км

КОС на рис.1 имеют характер «грибовидных течений» – вихревых образований в океане и атмосфере под действием магнитогидродинамических сил, существование которых подтверждено в ряде публикаций [4,5].

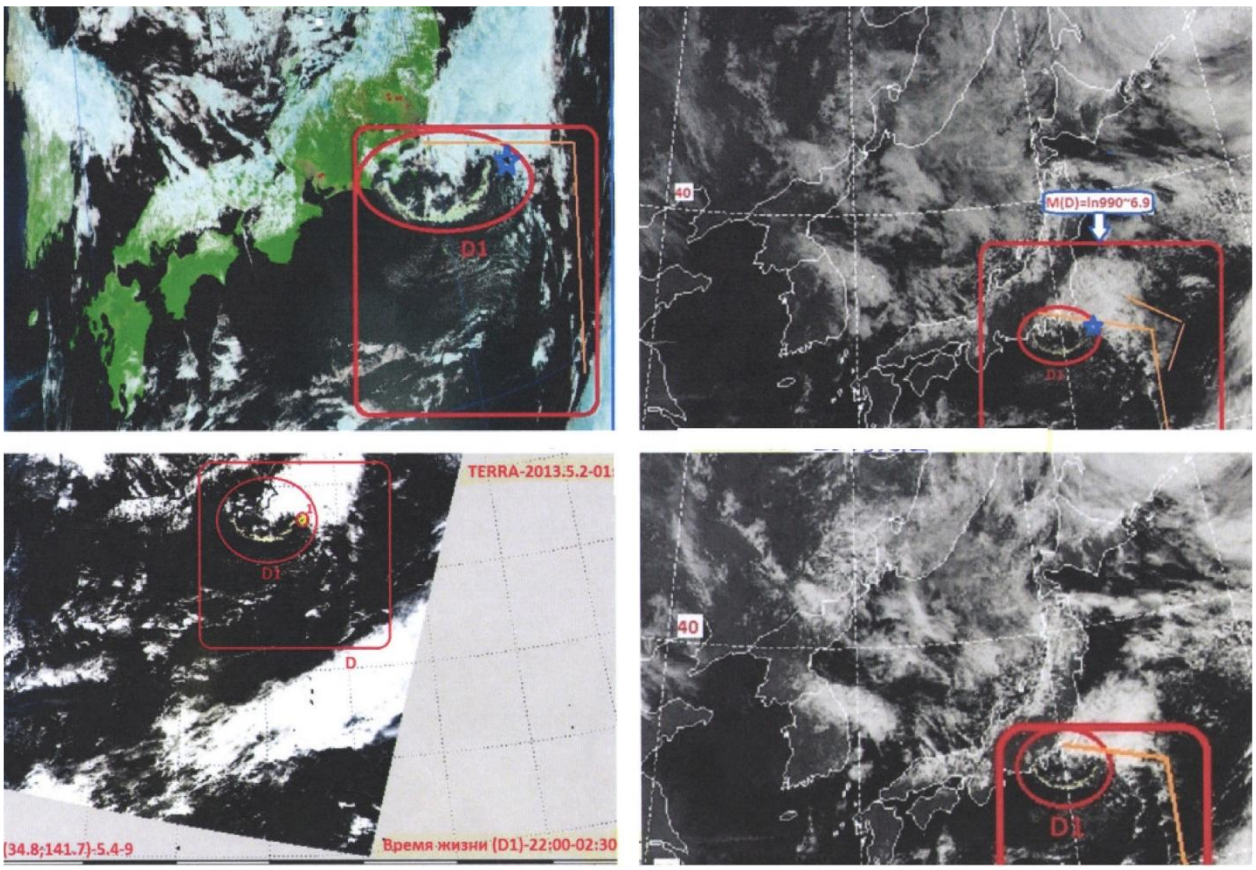


Рис.1 – Кольцевая облачная структура 02.05.2013г. на снимках с различных спутников

Образование и формирование подобных масштабных структур возможно и при взаимодействии естественного электромагнитного поля Земли и искусственно генерируемого модулированного знакопеременного магнитного поля как при стационарном воздействии, так и при сильном импульсном воздействии. В частности, в [5] получены приближенные нестационарные решения, описывающие формирование и эволюцию основных вихревых структур, возникающих в первоначально неподвижной вязкой жидкости при разного рода локализованном импульсном, а также непрерывном воздействии. Первоначальное формирование такой структуры происходит как следствие развития неустойчивости.

Характерной особенностью при генерации грибовидных течений является наличие прямого и обратных течений. Обратные течения могут возникать под действием знакопеременного магнитного поля. Визуализация подобных течений в атмосфере возможна из-за возникающих кавитационных пузырьков, дающим начало формированию облачных структур.

Отметим, что 01.05.2013г. примерно в 21:00 наблюдался резкий скачок (порядка 1000 В/м) напряженности атмосферного электрического поля (рис.2), зарегистрированный одной из станций Магнитной обсерватории Какиока (Япония). Скачок произошел перед началом формирования структуры и, можно предположить, что он послужил началом (триггером) КОС. Тогда структура формировалась за счет взаимодействия геомагнитного поля Земли и искусственного магнитного поля. Резкое падение напряженности атмосферного электрического поля было вызвано работой электромагнитных генераторов, а неустойчивость, необходимая для формирования структуры, связана с возникновением конвективных потоков заряженных частиц во внешнем магнитном поле.

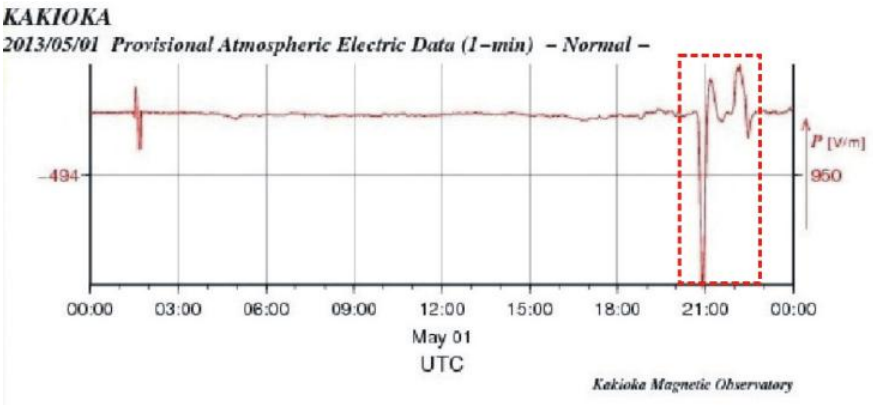


Рис.2 – Данные об атмосферном электрическом поле на станции Какиока, 01 мая 2013г..

После обнаружения КОС, показанных на рис.1, был выполнен повторный ретроспективный анализ космоснимков по мега-землетрясению Тохоку 11 марта 2011г. На известном тематически обработанном и опубликованном в работе [6] снимке (рис. 3) от 19 февраля 2011г. были обнаружены не очень хорошо различимые остатки КОС в виде системы вложенных окружностей. Развитие КОС детально показано на рис.4. Система КОС наблюдалась в течение более 4-х часов (с 01.30 до 05.30) в виде частей концентрических окружностей, выделенных пунктиром, на фоне сильной облачности, ограниченной с юго-запада L-образной облачной структурой. Если эту L-образную структуру, трассирующую энерговозбужденную часть юго-западной границы Охотской плиты, мысленно поднять и совместить с этой границей, то центр системы КОС фактически совпадает с будущим эпицентром землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. (красные кружки на рис.3) При этом система КОС, имеет характерную форму стоячих волн, что косвенно может свидетельствовать о том, что электроимпульсные или МГД эксперименты, проводились и перед землетрясением Тохоку в районе его будущего эпицентра. Исследование генезиса данных структур по мнению авторов представляет значительный интерес.

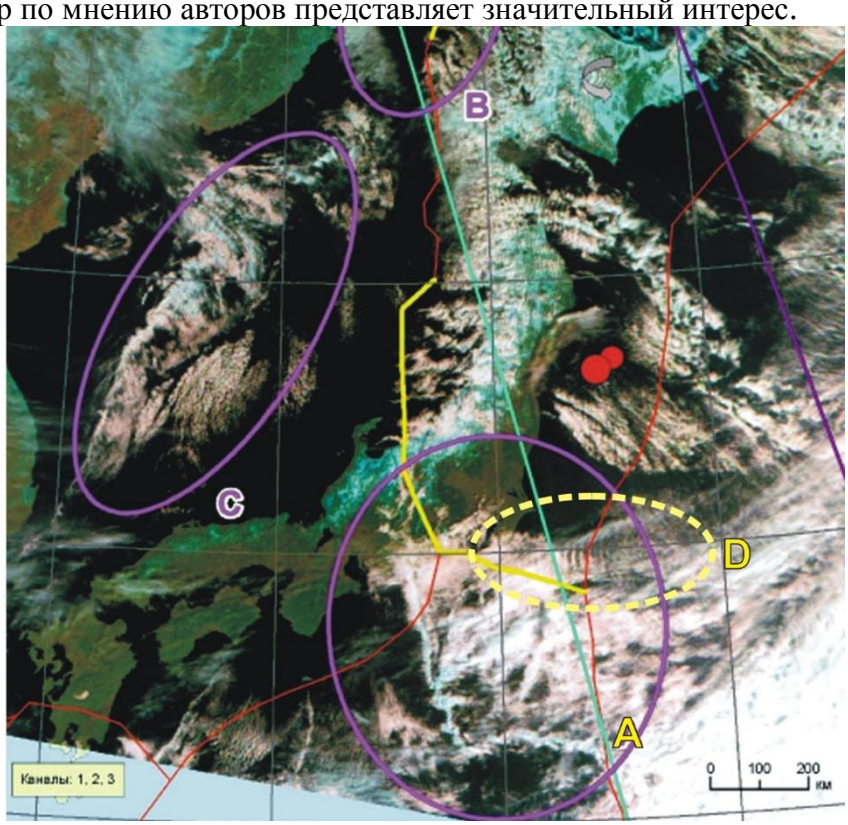


Рис.3 – L-структура (A) и остатки системы КОС (D) к юго-востоку от Японии на снимке от 19 февраля 2011г.

Облачные структуры, аналогичные рассмотренным, наблюдались в дальнейшем неоднократно вблизи берегов Японии, в частности, перед землетрясениями 2 и 13 марта 2014г., 30 июня (рис.5) и 11 июля 2014г. Крайне интересный пример подобной структуры, имеющей вид буквы D показан на рис.6., формированию которой также предшествовали аномальные всплески электромагнитных полей.

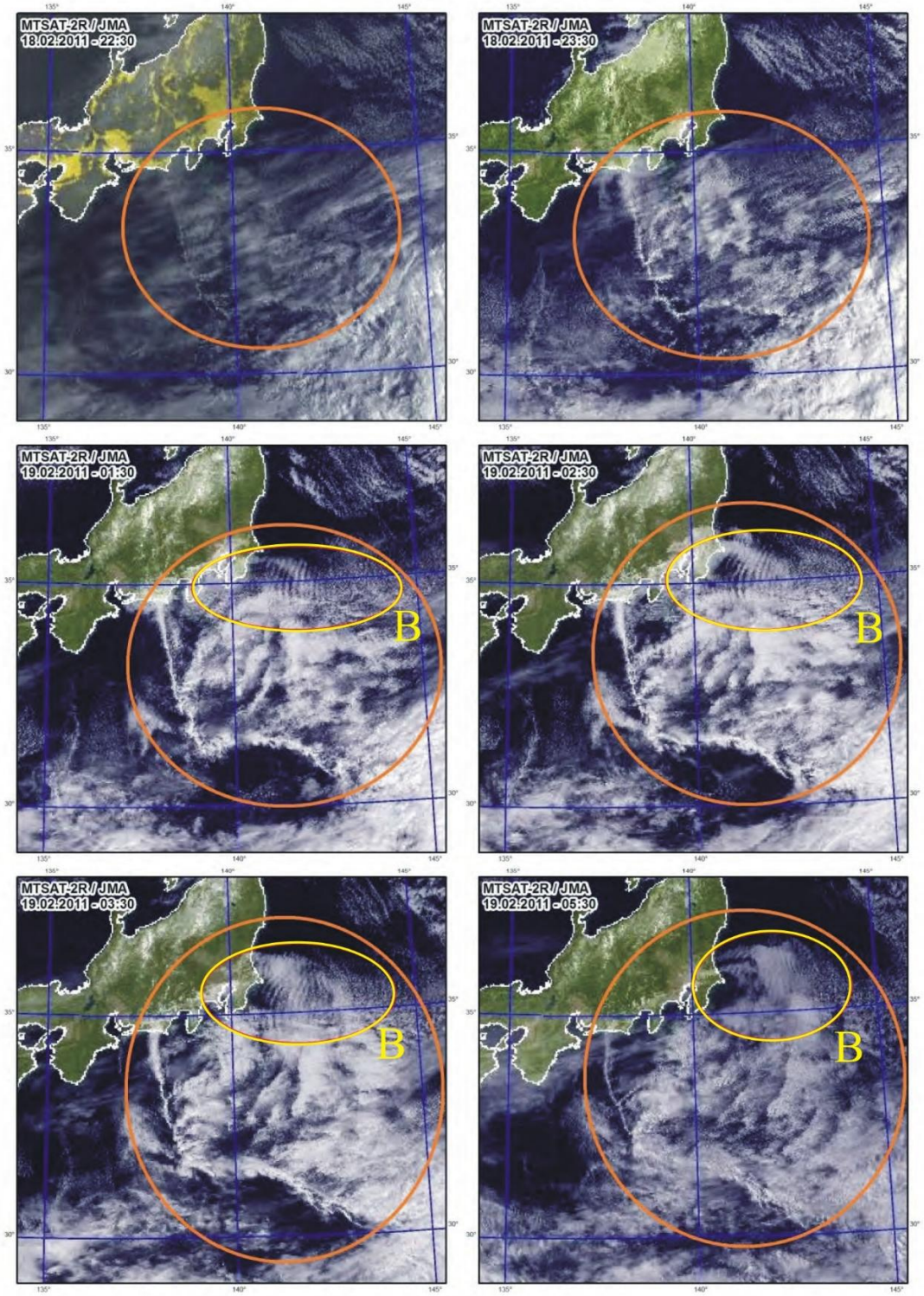


Рис.4 – Динамика L-структуры и КОС (В) на снимках MTSAT от 19.02.2011г.

Подобные КОС могут являться признаками проведения японскими геофизиками регулярных активных геофизических экспериментов по принудительной разрядке тектонических напряжений вдоль подводных литосферных разломов, являющихся дальнейшим развитием программ, подобных осуществляемой в Японии с 1996г. программе

ACROSS (Accurate Control Routine Operated Signal System). Подобные эксперименты могут иметь непредсказуемые последствия прежде всего для самой Японии.

Рис.5 – КОС (D) на снимке от 19 июня 2014г. 16:00

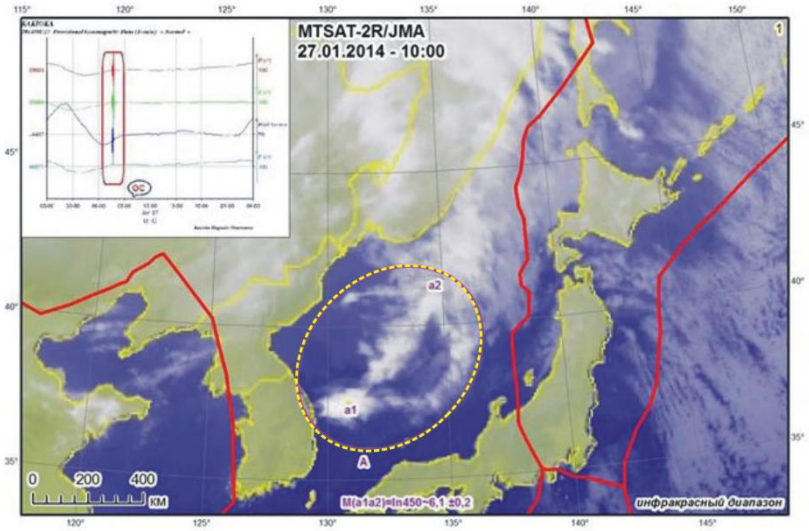


Рис.6 – КОС (A) на снимке от 27 января 2014г., 10:00

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (в соответствии с требованием государственного контракта № 14.577.21.0109, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0109) в Тульском государственном университете.

Список литературы

1. Дода Л.Н., Натяганов В.Л., Степанов И.В. Эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений // Доклады Академии наук: сер. Геофизика – 2013.– Т. 453.– № 5.– С.551-557.
2. Doda L.N., Dushin V.R., Natyaganov V.L., Smirnov N.N., Stepanov I.V. Earthquakes forecasts following space- and ground-based monitoring // Acta Astronautica.– 2011.– V.69.– P.18-23
3. Lyubushin A. Spots of Seismic Danger Extracted by Properties of Low-Frequency Seismic Noise // Geophysical Research Abstracts.– 2013.– Vol. 15.– EGU2013-1614-1
4. Корчагин Н.Н., Монин А.С. Мезоокеанология.– М.: Наука, 2004.
5. Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Грибовидные течения в океане (по данным анализа спутниковых изображений) // Исслед. Земли из Космоса.– 1984.– №3.– С.18-26.
6. Дода Л.Н., Мартынов О.В., Пахомов Л.А., Натяганов В.Л., Степанов И.В. Наземно-космический мониторинг и прогноз мегаземлетрясения в Японии 11 марта 2011 г. // НТР,– 2011.– Т. 90-– № 1.– С.35-44.

УДК 550.34; 528.88; 550.343

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ СИЛЬНЕЙШЕГО ГЛУБОКОФОКУСНОГО ОХОТОМОРСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 24 МАЯ 2013Г

Л.Н. Дода[1], В.Л. Натяганов[2], В.С. Бобровский[3], С.А. Шопин[1]

1 – ФБГОУ ВО Тульский государственный университет, г.Тула, Россия, sshopin@mail.ru

2 – ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г.Москва, Россия, tenzor@nbmgu.ru

3 – Инновационный фонд «Подземные электрические технологии», г.Петропавловск-Камчатский, Россия, Vad.Bobrovskiy@cosmetecor.org

Аннотация. Рассмотрено практическое использование концепции сейсмотектогенеза при анализе комплекса геофизических признаков сильнейшего глубокофокусного землетрясения в Охотском море в мае 2013г. с М8.3, позволившее своевременно разработать прогноз данного события, заблаговременно представленный в РЭС.

GEOPHYSICAL INDICATORS OF THE STRONGEST DEEP-FOCUS OKHOTSK SEA EARTHQUAKE OF 24 MAY 2013

L.N. Doda[1], V.L. Natyaganov[2], V.S. Bobrovskiy[3], S.A. Shopin[1]

1 – Tula State University, Tula, Russia, sshopin@mail.ru

2 – Moscow State University, Moscow, Russia, tenzor@nbmgu.ru

3 – Subterranean Electric Technologies Innovation Foundation, Petropavlovsk-Kamchatskiy, Russia, Vad.Bobrovskiy@cosmetecor.org

Practical usage of seismotectogenesis concept for the analysis of geophysical indicators of strongest deep-focus Okhotsk sea earthquake of May 2013 with M8.3 is presented. On the basis of performed analysis, prediction for this event was developed and timely presented to the Russian Expert Council on Earthquake Prediction and Seismic Hazard Assessment.

Введение. 24 мая 2013 г. в 05:44 (по Гринвичу) в акватории Охотского моря в 180 км от западного побережья Камчатки (координаты эпцентра 54.91°с.ш.; 153.34°в.д.**)** на глубине 605 км произошло сильнейшее землетрясение магнитудой М8.3. Землетрясение (ЗМТ) имело макросейсмический эффект: ощущалось во многих населенных пунктах РФ, в том числе в Москве, и было отнесено специалистами к уникальным [1]. Признаки подготовки данного события отслеживались авторами настоящей работы в реальном времени, что позволило своевременно подготовить прогноз, представленный в РЭС [2,3].

Методика мониторинга. Методической основной для мониторинга являлась эмпирическая схема краткосрочного прогноза (схема НЦ ОМЗ) [4] и являющаяся ее обобщением концепция сейсмотектогенеза (СТГ) [5,6], представляющая собой комплекс физически взаимосвязанных явлений, лежащих в основе механизма подготовки и запуска ЗМТ.

Основные положения концепции следующие:

1. Миграция водорода в геооболочках с границы “ядро-мантия’’ на поверхность Земли, его взаимодействие с геосредой изменяют её свойства; увеличение интенсивности протонной миграции в тектоногенах приводит к накоплению напряжений и деформаций, отражая суть протонного тектогенеза по В.Н. Ларину и Д.А. Кузнецову [7].

2. Движение протонов и электронов в глобальном электро-ротационном контуре «Солнце – межпланетное магнитное поле – геомагнитное поле – геооболочки» обеспечивает поддержание их суммарного баланса, а также играет определяющую роль в механизме подготовки и запуска землетрясений.

3. Перемещение (перераспределение) и взаимодействие масс в геооболочках и теле Земли, обусловленные внешними космическими факторами (влиянием планет, солнечной активности, вариациями собственного вращения и движения Земли по эклиптике и др.) и

внутриземными причинами, наблюдаемых при гравиметрических измерениях (приборы ШГМ, сверхпроводящие гравиметры и пр.) [8].

4. Наличие признаков подготовки ЗМТ обусловлено причинно-следственной связью аномалий гравитационного поля, нестабильностей обращения и вращения Земли, протонной миграции в геооболочках – с одной стороны, и сейсмотектонического процесса – с другой. Факт совпадения отмеченных аномалий на определенном временном интервале может указывать на приближение мощных ЗМТ с М 6,0+, а по месту – на зону подготовки ЗМТ.

5. Аномальные отклики в полевых структурах локальных зон геооболочек при подготовке и запуске ЗМТ являются локальными проявлениями глобальных геофизических аномалий. Облачные сейсмотектонические индикаторы (ОСТИ), как одно из проявлений таких аномалий, позволяют локализовать зону подготовки и определять потенциальную магнитуду ЗМТ по формуле $M=\ln(L/L_0)$, где L – протяженность ОСТИ в км, L_o = 1 км [3,4].

6. Запуск сейсмотектонического процесса имеет геомагнитно-меридианальную направленность и определяется цепочками ЗМТ вдоль проекции на геоид возмущенных геомагнитных трубок – сейсмомагнитных меридианов (СММ), активированных деформацией магнитосферы и высыпанием высокоэнергичных частиц (электронов и протонов) как «сверху» из радиационных поясов, так и «снизу»- из зон протонного насыщения тектоногенов; расчет СММ проводится по специально разработанному алгоритму [4,5].

7. Геоэффективные явления на Солнце, инициирующие геомагнитные возмущения определенного класса**,** позволяют вычислять дату возможного ЗМТ и запускают триггерный механизм ЗМТ в среднем на 7, 14 или 22 сутки (эффект D-триггера) в зонах, накопивших достаточный для сброса упругой энергии потенциал механических напряжений и деформаций. Поистине, землетрясения рождаются на Солнце, а при запуске — откликаются геосейсмическим эхом солнечных бурь [9].

Строгая иерархическая упорядоченность закономерностей отражает последовательность и взаимодействие процессов в механизме подготовки и запуска ЗМТ. Достижение параметрами, входящими в приведенные закономерности, определенных предельных, резонансных или др. критических значений является пространственно-временной областью перевода процесса подготовки в запуск и далее в сам факт ЗМТ.

Концепция СТГ позволяет сформировать наземно-космическую систему сейсмопрогнозного мониторинга (НКС СПМ), т.е. определить какие параметры контролировать и как интерпретировать получаемые данные. В состав НКС СПМ входят:

1. Станции специальных гравиметрических измерений Тульского государственного университета (широкополосные градиентометры, разработчик д.т.н, проф. О.В. Мартынов).

2. Станции подземно-электрических (протонных) измерений дистантной школы «Космометеотектоника» в г. Петропавловск-Камчатский (разработчик к.ф-м.н. Д.А. Кузнецов).

3. Станции электротеллурических измерений в Японии (Какиока, Мемамбецу, Каноя) и Греции.

4. Международные спутниковые системы дистанционного зондирования Земли, включающие геостационарные спутники MeteoSat, MTSAT1R, низкоорбитальные Terra и Aqua, Ресурс-ДК и др., тематически обрабатываемые и организованные в пополняемые базы данных.

5. База данных Парижского центра вращения Земли (Paris Observatory, Earth Rotation Center, http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/).

6. Базы данных гелиогеофизических параметров различных стран с открытым интернет-доступом: база данных Центра предсказания космической погоды (NOAA/NWS Space Weather Prediction Center, http://www.swpc.noaa.gov/), отчет о солнечной активности (Solar Terrestrial Activity Report, http://www.solen.info/solar/index.html), база данных лаборатории астрофизики и физики Солнца (ATC Technologies Solar & Astrophysics Laboratory, http://www.lmsal.com/solarsoft).

7. Данные радоновых измерений (Горно-Алтайск, Италия и ряд других источников).

Совершенствование отдельных компонентов НКС СПМ и включение в нее дополнительных физически обоснованных параметров, совместно с развитием методов анализа и обработки данных позволит увеличить достигнутую к настоящему времени точность прогнозирования ЗМТ.

Признаки Охотского ЗМТ. Рассмотрим процедуру анализа признаков Охотского ЗМТ на основе закономерностей концепции СТГ, позволившую заблаговременно разработать прогноз данного события.

На 1-м этапе анализа по аномальным значениям гравитационных, георотационных, протонных, деформационных и др. признаков определяется временной интервал совпадения (квазисинхронности) аномалий, который должен указывать на приближение мощного ЗМТ. Для данного события такой интервал пришелся на 24–28 апреля 2013 г. Соответствующие графики сигналов системы ШГМ-3 и протонных измерений приведены на рис.1, 2.

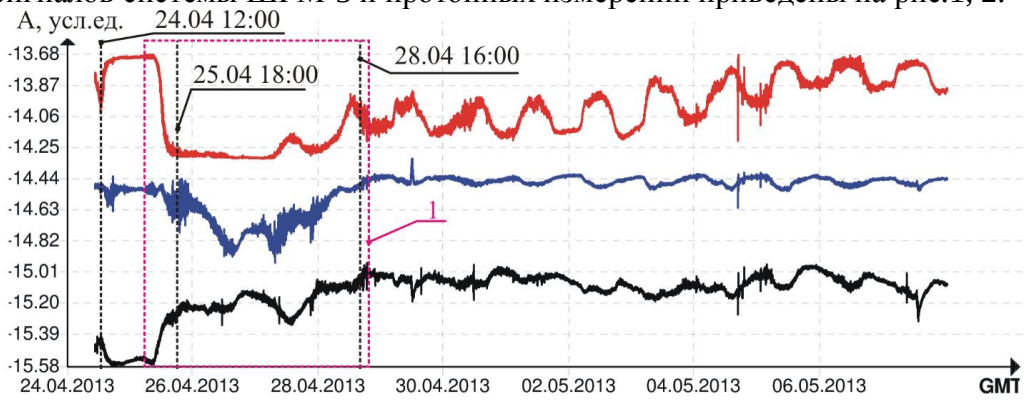


Рис.1 – Данные ШГМ-3 за период 24.04.2013 г.–07.05.2013 г.: 1 – аномальная зона

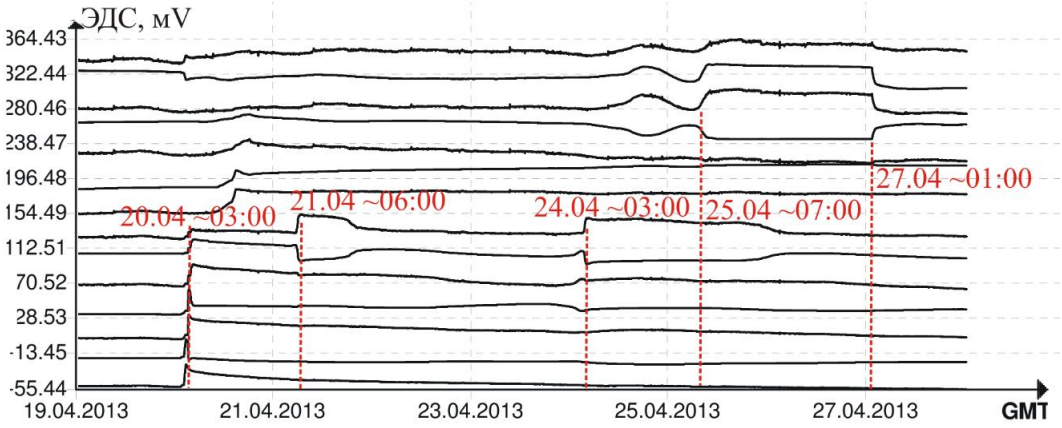


Рис.2 – Данные подземно-электрических измерений, постоянная составляющая ЭДС, станция S2-IFSET, Петропавловск-Камчатский за период 19.04.2014 г.–27.04.2014 г.

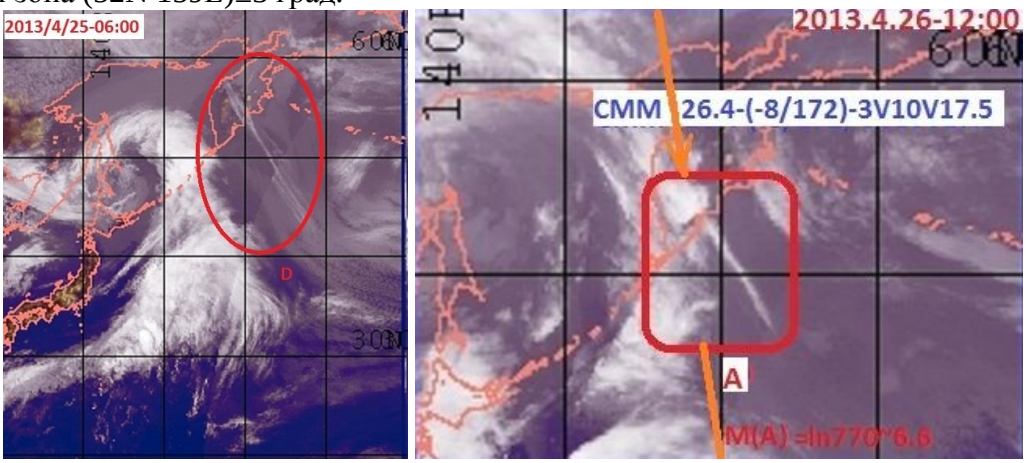
На указанном интервале и спустя 4 суток после были обнаружены ОСТИ над Камчаткой 25.04–26.04.2013 г. (рис. 3). Их протяженность определяла потенциальные магнитуды возможных сейсмических событий для Камчатки по методике [3] как M(A) = ln 770…≈6.6±0.2.

На этом же этапе также проводится анализ и соответствующий выбор землетрясений аналогов-прототипов. Одним из основных критериев в такой процедуре является изосейсмичность Чандлеровской траектории и параметров вращения Земли в рамках 6-летних и кратных им гармоник]. Такими аналогами были выбраны землетрясения на Камчатке 04.05.1911г. – M7.5, 13.04.1923г. – M7.6, 04.05.1959г. – M7.6 соответственно со следующими 6 кратными гармониками относительно 2013 г.: 6x17, 6x15 и 6x9 лет.

На 2-м этапе определяются и уточняются возможные даты и зоны ЗМТ. По геомагнитным возмущениям 24 и 26 апреля были рассчитаны сейсмомагнитные меридианы запуска возможных ЗМТ с долготами на экваторе (-10/170) и (-8/172) град. и

потенциальными датами 08-10 или 15-17 мая ± 2 сут., рассчитанными по 2-х или 3-х недельным гармоникам триггерного механизма запуска ЗМТ. Пересечения СММ с границами литосферных плит определяли центры кругов радиусом 7 град. потенциальных зон ЗМТ.

Анализ указанных признаков позволил работать прогноз ЗМТ в районе Камчатки, направленный 26.04.2013г. по электронной почте председателю РЭС чл.корру РАН А.В. Николаеву со следующими параметрами: дата до 19.05.2015г., магнитуда 6.6+, наиболее вероятная зона (52N 159E)±3 град.



а) б)

Рис.3 – ОСТИ над Камчаткой на снимках: а) 25.04.2013 г. 06:00, б) 26.04.2013 г. 12:00

Об отработке рассчитанных СММ сигнализировали следующие ЗМТ (дата – координаты эпицентра – магнитуда – глубина – район):

1) 11.05.2013 – (-17.5; -175.1) – 6.5 – 200 – о.Тонга
2) 14.05.2013 – (18.8; 145.2) – 6.8 – 605 – Марианские острова
3) 18.05.2013 – (37.8; 141.6) – 6.0 – о.Хонсю, Япония
4) 09.05.2013 – 18:44 – (52,3; 160,2) – 5.9 (6.2) – 10 – ю/в Камчатки
5) 21.05.2014 – серия 03:05, 03:08, 05:43 – 5.8 (6.0), 5.8 (6.2), 6.1 (6.2) – 10,30,40 – в. Камчатки (на следующий день после пролонгации прогноза).

Отметим, что событие №4 (как и последующий рой более слабых ЗМТ) произошло в прогнозной зоне, в прогнозные даты, но с меньшей магнитудой.

На каждом этапе при выявлении новых признаков проводится корректировка и дополнение прогнозных параметров ЗМТ. Так, 20.05.2013 г. (06:00-09:30) над акваторией Охотского моря были обнаружены ОСТИ углообразной формы протяженностью до 2500 км (рис.4), дававшие потенциальную магнитуду M(D) = ln 2500~7.8±0.2. Кроме того, на Камчатских станциях школы «Космометеотектоника» 20 и 22 мая были зафиксированы аномально высокие всплески (рис.5,6), что происходило на фоне аномальной траектории Чандлера.

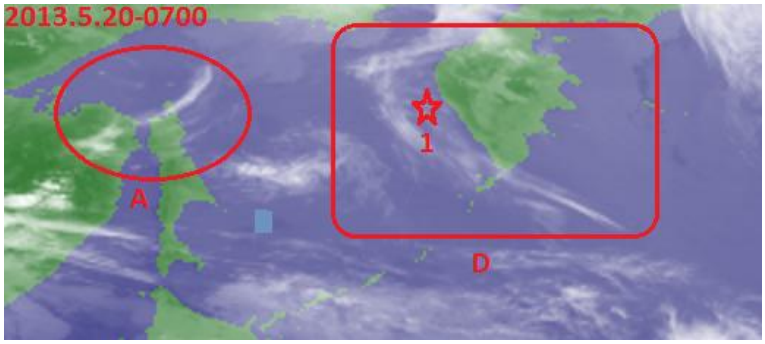


Рис. 4 – Углообразный ОСТИ над Охотским море 20.05.2013 г.

По совокупности факторов было принято решение о пролонгировании прогноза от 26.04.2013, срок действия которого истек 19 мая, до 16 июня с прежними параметрами.

Данное решение было оформлено прогнозной заявкой в РЭС, имеющей официальную регистрацию 20.05.2013г.

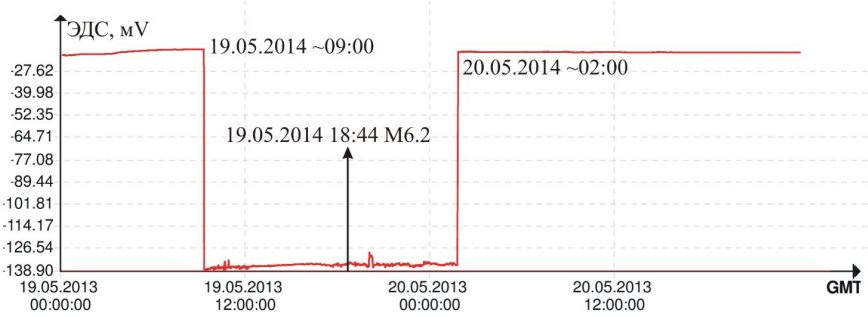


Рис.5 – Данные станции S2-IFSET, канал SW23 за период 19.05.2013 г.–20.05.2013 г.: стрелкой указано время ЗМТ 19.05.2014 г. в районе Камчатки с М6.2

Рис. 6 – Данные станции S2-IFSET, канал NE34 за период 24.04.2013 г.–23.05.2013 г.: 1 – аномальные всплески 19.05.2013 г. и 22.05.2013 г.

23 мая 2013 г. произошло землетрясение на ю.Фиджи, запущенное с рассчитанных СММ, а 24 мая произошло глубокое землетрясение в Охотском море с М8.3 (7.7), подтвердившие обоснованность выполненного анализа и разработанного прогноза.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (в соответствии с требованием государственного контракта № 14.577.21.0109, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0109) в Тульском государственном университете.

Список литературы

1. Рогожин Е.А., Завьялов А.Д., Зайцева Н.Д. Макросейсмические проявления Охотоморского землетрясения 24.05.2013г. на территории г. Москвы // Вопросы инженерной сейсмологии.– 2013.– Т. 40.– № 3.– С.64-77
2. Doda L.N., Malashin A.A., Natyaganov V.L., Stepanov I.V. Seismotectonics and ground–space monitoring of natural disasters precursors in the Earth // Acta Astronautica.–2015.– Vol.109.– C. 254–263
3. Natyaganov V.L., Doda L.N., Stepanov I.V., Venkatanathan N. Cloud seismotectonic indicators and anomalies OLR as forerunners of earthquakes // Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, August 24-29.– 2014.– C. 1293-1303
4. Дода Л.Н., Натяганов В.Л., Степанов И.В. Эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений // Доклады Академии наук: сер. Геофизика.– 2013.– Т. 453.– № 5.– С.551-557.
5. Doda L.N., Dushin V.R., Natyaganov V.L., Smirnov N.N., Stepanov I.V. Earthquakes forecasts following space- and ground-based monitoring // Acta Astronautica.– 2011.– V.69.– P.18-23
6. Дода Л.Н., Натяганов В.Л., Степанов И.В., Чайка А.А. Космогеофизическая концепция прогноза землетрясений // Газовая и волновая динамика: выпуск 5.– М.: Айрис-пресс, 2013, С.167-197
7. Кузнецов Д.А. Протонно-электрическая подготовка и запуск полиморфного вскипания протонов в очаге землетрясения. Депонент ВИНИТИ, 1991, 1371-В91
8. Мартынов О.В. Концепция прогноза природных катастроф и практические результаты, полученные на основе аппарата нелинейной физики, математики и данных системы //Нелинейный мир.– 2008.– № 10.– Т. 6.– С. 579-615
9. Дода Л.Н. Геосейсмическое эхо солнечных бурь, или землетрясения рождаются на Солнце // Новости космонавтики.– 2003.– Т.13.– № 6(245).– С.56-59.

УДК 550.83

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ГРАВИРАЗВЕДКИ И МАГНИТОРАЗВЕДКИ

А.С. Долгаль, А.В. Мичурин, П.Н. Новикова
dolgal@mi-perm.ru, ami@59.ru, polina@mi-perm.ru
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

Рассматривается применение монтажного метода при интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки с целью обнаружения и локализации возмущающих объектов. Предлагаются методы анализа множества допустимых решений обратной задачи и критерии выбора "наилучшего" частного решения.

FINITE ELEMENT TECHNIQUE IN SOLVING GRAVITY AND MAGNETIC INVERSE PROBLEMS

A.S. Dolgal, A.V. Michurin, P.N. Novikova
Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

The application of the fitting method in interpreting of gravity and magnetic data for the detection and localization of disturbing objects is considered. The analysis methods of the acceptable solutions set of the inverse problem and the selection criterion of the "best" particular solution is offered.

Метод конечных элементов (МКЭ) — численный метод, использующийся для решения широкого круга задач механики твердого тела, теплообмена, гидродинамики и др. В частности, МКЭ является важнейшим инструментом построения геоэлектрических моделей сложных геологических сред по измерениям нестационарных электромагнитных полей [1]. Суть МКЭ заключается в приближенной замене континуальной задачи математической физики на дискретную, что позволяет более полно представить себе весь процесс ее решения, избежать многих возможных ошибок и объективно оценить получаемые результаты [2].

Применение МКЭ в гравиразведке было предложено в середине 1970-х годов [3,4] и базируется на использовании дискретного (сеточного) описания геологической среды, вмещающей аномалиеобразующие массы, которая представляется в виде объединения некоторого числа элементарных геометрических фигур □□ (к примеру, прямоугольных призм), плотность каждой из которых принимается постоянной. Описание алгоритма монтажного метода решения обратных задач гравиразведки и магниторазведки можно найти в работах [5,6,7 и др.]. Необходимо отметить, что далее основное внимание будет уделено именно интерпретации данных гравиразведки, однако все основные теоретические положения и выводы очевидным образом распространяются в область магниторазведки. Исключение составляет оценка параметров источников интенсивных (>5000 нТл) магнитных аномалий, обусловленных, в частности железорудными залежами, при которой необходимо учитывать взаимное влияние магнитных объектов.

Конечноэлементный подход к решению ОЗГ снимает проблему неустойчивости в ее классическом понимании, так как конечная размерность модели и природные ограничения на ее плотностные и геометрические параметры изначально приводят к компактному множеству возможных решений, а учет определенного объема априорной информации в процессе построения результативных конфигураций обеспечивает надежное решение поставленной геологической задачи. К обязательным априорным ограничениям, задаваемым интерпретатором, относятся: количество тел в модели источников поля и их плотности; местоположение фрагментов каждого из тел (как минимум - по одному элементу ω_α на каждое тело); допустимая величина невязки исходного и подобранного полей (обычно в евклидовой метрике); размер стороны элемента замощения ω_α. К желательным (для

повышения надежности результатов интерпретации) относятся следующие сведения: область, заведомо содержащая источники поля; область, заведомо не содержащая источники поля; минимально и максимально возможные глубины погружения верхней и нижней кромок тел; ограничения на вертикальную мощность каждого из тел; ограничения на горизонтальную мощность каждого из тел; любые (помимо обязательных) фрагменты тел; условия допустимости контактирования отдельных аномалиеобразующих тел; условие гладкости поверхностей тел (в самом простом случае - требование безотростковости подобранных носителей масс [7]).

Принципиально новые возможности обеспечивает использование монтажного метода при *обнаружении и локализации* возмущающих объектов по аномалиям геопотенциальных полей. В общем случае задачи обнаружения и локализации источников поля в исследуемом разрезе (объеме) следует рассматривать отдельно. Первые представления об источниках дают особые точки и интегральные характеристики - однозначно определяющиеся по наблюденному полю параметры. Дополнительную (но часто весьма искаженную) информацию о пространственном распределении плотности дает интерпретационная томография. Вышеперечисленные методы служат инструментами для *обнаружения* аномалиеобразующих объектов. Задача *локализации*, включающая в себя оценку глубины залегания, размеров и формы объектов обычно решается методом подбора (в выбранном модельном классе M источников). Эти оценки обеспечивает единичное квазирешение обратной задачи гравиразведки (ОЗГ) - аппроксимационная модель, отвечающая требуемой невязке наблюденного и модельного полей и удовлетворяющая имеющейся априорной информации.

В методологическом плане комплексирование разных методов решения ОЗГ определяется необходимостью последовательного решения сначала задачи *обнаружения*, а затем *локализации* возмущающих объектов. Можно привести множество примеров успешного применения различных модификаций метода автоматизированного подбора при построении начальных приближений ("стартовых моделей") с помощью вспомогательных методов, направленных на решение задачи *обнаружения*. Повышение достоверности интерпретационных построений на основе решения вышеуказанных задач в классе конечноэлементных моделей геологической среды можно связать с формированием репрезентативных множеств допустимых решений ОЗГ; специализированными методами анализа этих множеств; выборе "наилучшего" решения обратной задачи из репрезентативного множества на основе анализа его структуры.

Формирование репрезентативных множеств Q допустимых решений ОЗГ размерностью $\sim(10^1\text{-}10^3)\times N$, N=1,2,..10 обеспечивает использование монтажного метода при различном местоположении начальных элементов замощения ω_α, равномерно покрывающих области предполагаемого наличия аномалиеобразующих тел. В самом процессе построения решений может быть учтена разнородная априорная информация - представления об односвязности объектов, гладкости их границ, ограничения на горизонтальный и вертикальный размер и т.п. Сравнительно малый по отношению к моделируемым геологическим телам размер элемента ω_α снимает ограничения, связанные с аппроксимационными возможностями их конечноэлементного представления M при решении задач "рудного типа".

Решение задачи *обнаружения* возмущающих объектов осуществляется с использованием всей информации, содержащейся в множестве Q, для представления которой используются методы, базирующиеся на детерминистском или вероятностно-статистическом подходе. В результате детерминистских оценок удается построить две области: D_1, объединяющие все полученные решения ОЗГ и D_2, являющуюся их пересечением и представляющую собой фрагменты геологического пространства, заведомо принадлежащие источникам. При наличии k возмущающих объектов в моделируемом разрезе (объеме) число этих областей не превышает $2k$. Для каждого из объектов S^k справедливо включение: $D_2^k \subset S^k \subset D_1^k$. Для части пространства, заведомо принадлежащей источникам поля можно

построить функцию предпочтения $\nu(\omega_\alpha)$, характеризующую пространственное положение областей D_1, D_2 при различном уровне помех ε в наблюденном гравитационном поле: $\nu(\omega_{\alpha(1)}) > \nu(\omega_{\alpha(2)}) \leftrightarrow (\omega_{\alpha(2)} \subset S^k \rightarrow \omega_{\alpha(1)} \subset S^k)$. При решении практических задач нередко возникает ситуация $D_2=\varnothing$, поэтому более универсальным инструментом является вероятностно-статистический подход к описанию структуры множества Q. Функция локализации $\phi(\omega_\alpha)$ характеризует вероятность P присутствия аномалиеобразующего объекта в элементарном объеме среды ω_α, полученную в результате N равновозможных исходов эксперимента [9]. Очевидно, что в пределах области с нулевыми значениями функции $\phi(\omega_\alpha) = 0$ аномалиеобразующие массы будут отсутствовать, а область значений $\phi(\omega_\alpha) = 1$ представляет собой фрагмент, гарантировано принадлежащий возмущающему объекту S^k. При значительной неопределенности априорных данных, а также при высоком уровне помех в наблюденном поле эффективно работает критерий обнаружения аномалиеобразующих тел: $\phi(\omega_\alpha) \geq P\phi(\omega_\alpha)_{max}$, где $0.7 \leq P \leq 0.8$. Близкая по физическому смыслу к функции $\phi(\omega_\alpha)$ *функции обнаружения* $F(X,h)$, позволяет получить оценку вероятности подсечения кровли возмущающего объекта вертикальной скважиной глубины h, заданной в точке с координатой X (или X,Y в 3D варианте) [10].

Можно охарактеризовать функции $\phi(\omega_\alpha)$ и $F(X,h)$ с позиций теории нечетких множеств, т.е. после выбора величины доверительной вероятности P_0 рассматривать совокупность значений $\phi(\omega_\alpha) = P_0$ как границу аномалиеобразующего объекта, а $F(X,h) = P_0$ - как его кровлю. Эту новую информацию можно использовать при повторном решении серии ОЗГ с целью уточнения множества Q.

Задача *локализации* решается на основе выбора "наилучшего" варианта интерпретации q^* из некоторого конечного множества Q конкурирующих между собой частных решений ОЗГ. Эта задача, по сути, является задачей о принятия решений в условиях неопределенности и ее результат всегда зависит от некоторого правила (критерия), используемого в процессе ее решения. Располагая множеством Q и его дополнительными характеристиками (в частности - функцией локализации $\phi(\omega_\alpha)$), полученными ранее с целью *обнаружения* источников, аномалий, можно построить различные стратегии выбора "наилучшего" решения из элементов этого множества. Наиболее осторожной стратегией является использование критерия минимакса - выбор решения ОЗГ, обеспечивающего максимум ρ – гарантированной меры близости построенной модели источника аномалии к реальному возмущающему объекту [11]. Другой стратегией является выбор решения q^* по максимуму апостериорной вероятности $P_{max} = \sum \phi(\omega_\alpha)/n_k = max$, $\forall \omega_\alpha \in q^*$, где n_k - количество элементов замощения ω_α в этом решении. Для выбора q^* могут быть использованы и другие критерии, в частности - критерий минимакса и критерий Лапласа, который гласит, что, поскольку распределение вероятностей внутри q^* неизвестно, нет причин считать их различными: $\forall \omega_\alpha \in q^*$: $\phi(\omega_{\alpha(1)}) \approx \phi(\omega_{\alpha(2)}) \approx \phi(\omega_{\alpha(3)})$ ... Параметры наилучшего по любому из критериев решения ОЗГ q^* также могут быть использованы при формировании нового (более узкого) множества Q, т.е. обеспечить еще один вариант обратной связи в решении задач обнаружения и локализации геологических объектов по аномалиям силы тяжести.

Следует подчеркнуть, что решение ОЗГ в адекватном реалиям модельном классе M при наличии неустранимых помех в наблюденном поле (преимущественно геологической природы) по критерию минимума невязки полей (который носит косвенный характер!) может быть существенно хуже по качеству, чем решения по критерию минимакса или по критерию максимума апостериорной вероятности.

Рассмотрим модельный пример: на профиле длиной 10 км с равномерным шагом задано поле Δg, обусловленное тремя 2D-объектами с избыточной плотностью $\delta_1 = 0.15$ г/см^3, $\delta_2 = 0.45$ г/см^3, $\delta_3 = 0.25$ г/см^3 (слева направо), общая площадь сечений B которых составила 3.11 км^2. Полученное при решении прямой задачи гравитационное поле было

осложнено нормально распределенной помехой, обладающей нулевым средним значением и среднеквадратическим отклонением 0.35 мГал. Решение ОЗГ проводилось монтажным методом, предполагалась односвязность аномалиеобразующих объектов и гладкость их границ, вводились ограничения на размер тел по осям *OX* и *OZ* (допускалось превышение истинных размеров не более, чем в 2 раза). Размер элемента замощения ω_α составлял 100×100 м. Для каждого решения ОЗГ местоположение начальных элементов ω_α, принадлежащих моделируемым телам, определялись случайным образом. При пороговом значении невязки "наблюденного" и модельного полей ε = ±0.35 мГал было получено 974 допустимых решения ОЗГ. С использованием трех критериев – минимума невязки, минимакса и максимума апостериорной вероятности были выбраны 3 частных решения ОЗГ (рис. 1, табл.).

Таблица

Параметры аномалиеобразующих объектов, отвечающие различным решениям ОЗГ

Критерий выбора решения ОЗГ	Общая площадь B_s сечений объектов, км^2	$B \cap B_s$, км^2	$B \cap B_s$, %
Минимум невязки	2.99	1.09	35
Минимакс	3.03	1.71	55
Максимум апостериорной вероятности	3.35	1.83	59

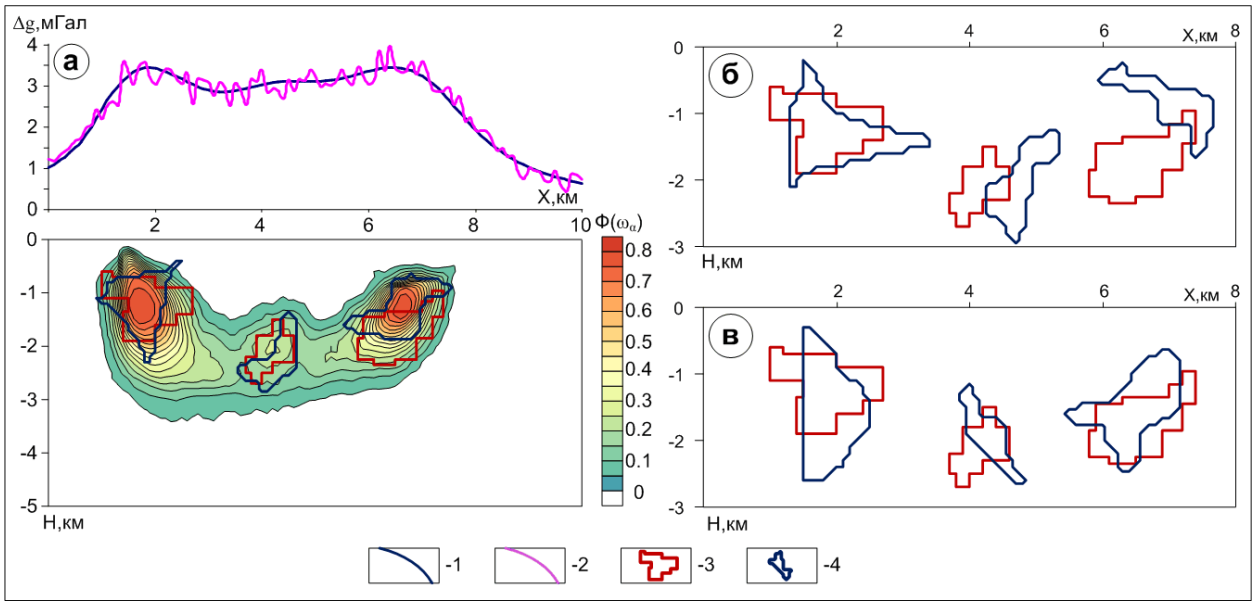


Рис. 2. Решения ОЗГ, отвечающие: критерию минимакса (а); минимуму невязки полей (б); максимуму апостериорной вероятности (в): 1 - модельное поле; 2 - исходное поле; 3 - источники поля; 4 - подобранные объекты.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 15-05-01823А).

Литература

1. *Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г.* 3D-электроразведка становлением поля. Новосибирск: Наука, 2009. 218 с.

2. *Розин Л.А.* Стержневые системы как системы конечных элементов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. 232 с.

3. *Овчаренко А.В.* Подбор сечения двухмерного тела по гравитационному полю // Вопросы нефтяной и рудной геофизики. Алма-Ата: Изд-во Казахского политехн. ин-та, 1975. Вып. 2. С. 71-75.

4. *Страхов В.Н., Лапина М.И.* Монтажный метод решения обратной задачи гравиметрии // Докл. АН СССР. 1976. Т. 227. № 2. С. 344 – 347.

5. *Балк П.И., Долгаль А.С.* Трехмерные монтажные технологии интерпретации гравиметрических данных // Доклады РАН. 2009. Т. 427. №3. С. 380–383.

6. *Балк П.И., Долгаль А.С., Христенко Л.А.* Локализация геологических объектов по данным гравиразведки при неполной информации о плотности горных пород //Доклады Академии наук. 2012. Т. 442. № 5. С. 686–690.

7. *Балк П.И, Долгаль А.С.* Конечноэлементные технологии моделирования в гравиразведке. Монтажный метод и гарантированный подход при решении обратных задач. LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrucken. 2013. 77 с.

8. *Балк П.И.* Использование априорной информации о топологических особенностях источников поля при решении обратной задачи гравиметрии // Докл. АН СССР. 1989. Т.309. № 5. С. 1082–1084.

9. *Долгаль А.С., Шархимуллин А.Ф.* Повышение точности интерпретации моногеничных гравитационных аномалий // Геоинформатика, 2011. № 4. С. 49-56.

10. *Балк П.И., Долгаль А.С.* Детерминистские модели интерпретации для оптимизации местоположения и глубин заложения скважин при заверке гравитационных аномалий // Физика Земли. 2015. №1. С. 98-111.

11. *Балк П.И., Долгаль А.С.* Минимаксный подход к решению обратных задач гравиразведки и магниторазведки // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462. № 6. С. 706-710.

УДК 550.83

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ЭФФЕКТА СФЕРИЧЕСКОГО ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА

А.С. Долгаль, В.В. Хохлова
dolgal@mi-perm.ru, valxov@gmail.com
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

Предлагается новый адаптивный кубатурный алгоритм вычисления гравитационного эффекта, создаваемого сферическим параллелепипедом, обладающий высокой точностью и быстродействием.

THE ALGORITHM FOR COMPUTING GRAVITY EFFECT OF SPERICAL PARALLELEPIPED

A.S. Dolgal, V.V. Khokhlova
Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

The article proposes new adaptive cubature algorithm for computing gravity effect produced by spherical parallelepiped, which possesses a high accuracy and processing speed.

При решении подавляющего большинства геокартировочных и прогнозно-поисковых геологических задач методом гравиразведки в силу ограниченных размеров изучаемых площадей пренебрегают шарообразной формой Земли. Существуют различные мнения по поводу целесообразности учета сферичности Земли при обработке и интерпретации материалов гравиметрических съемок. По мнению В.Н. Страхова такой учет необходимо проводить для территорий, обладающих линейными размерами более 100 км [1]. В.Н. Сеначин и его соавторы в работе [2] предполагают, что это необходимо лишь для построения региональных геоплотностных моделей с площадью более 20 млн. км^2. Результаты вычислительных экспериментов авторов доклада согласуются с первым из этих мнений [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Традиционные подходы к количественной интерпретации гравитационных аномалий базируются на решение прямых и обратных задач гравиразведки для 1-й вертикальной производной потенциала V_z в прямоугольных координатах $\sum XYZ$, т.е. используют модель "плоской Земли". Представления о сферической Земле требуются при региональных исследованиях [4]. Если пренебречь полярным сжатием нашей планеты, то можно считать, что Земля имеет форму шара с радиусом 6371 км. Данная модель, как показано целым рядом исследователей, успешно может использоваться для решения подавляющего большинства прикладных задач. При этом для описания геометрии источников и местоположения точек расчета поля применяется сферическая система координат $\sum r\varphi\lambda$, а интерпретируемые значения силы тяжести отождествляются с радиальной составляющей V_R гравитационного потенциала.

Элементарным аппроксимирующим телом для решения прямой задачи гравиметрии может являться сферический параллелепипед (СП) - заполненный аномалиеобразующими массами фрагмент шара радиусом R с центром, совпадающим с началом координат O системы $\sum r\varphi\lambda$ [3]. СП ограничен двумя сферическими поверхностями с радиусами r_1, r_2; двумя плоскостями, направленными под углами λ_1,λ_2 в экваториальной плоскости и пересекающимися на полярной оси OZ; двумя коническими поверхностями φ_1,φ_2 с вершиной в точке O (рис.1). Составляющая V_R его гравитационного потенциала для точки R, φ_0, λ_0 определяется выражением:

$$V_R(R,\varphi_0,\lambda_0) = f\sigma \iiint_{r_1,\varphi_1,\lambda_1}^{r_2,\varphi_2,\lambda_2} (R - r\cos\omega) r_0^{-3} r^2 \sin\varphi dr d\varphi d\lambda \quad (1),$$

где $r_0 = \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr\cos\omega}$, σ – плотность тела; r, φ, λ – переменные интегрирования, ω –

угол при центре шара между точками А и М: $cos\omega = cos\varphi_0 cos\varphi + sin\varphi_0 sin\varphi\, cos(\lambda_0 - \lambda)$ (рис. 1). В аналитическом виде представить интеграл (1) невозможно, поэтому для расчета гравитационного эффекта в данном случае необходимо использование численных методов. В.И. Старостенко с соавторами для решения этой задачи предложено использование адаптивного алгоритма, основанного на квадратурных формулах Гаусса-Лежандра [6].

С учетом требований В.Н. Страхова к точности, быстродействию и устойчивости алгоритмов решения прямых задач [7] и использованием вычислительных возможностей современных компьютеров была выполнена разработка программно-математического обеспечения для расчетов по формуле (1), основанного на адаптивном квадратурном алгоритме, являющемся весьма эффективным для вычисления интегралов от функций с особенностями [8].

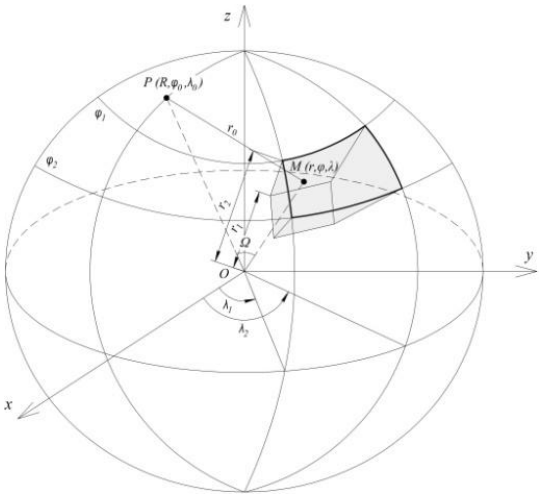


Рис. 1. Сферический параллелепипед

Примем сокращенные обозначения: $f(X)$ – подъинтегральная функция в выражении (1), Ω – объем рассматриваемого СП, $\Omega = \{r_1 \le x_1 \le r_2,\ \lambda_1 \le x_2 \le \lambda_2,\ \varphi_1 \le x3 \le \varphi_2\}$. Заменой переменных $x_1 = (r_1 + r_2)/2 + (r_1 - r_2)/2$, $x_2 = (\lambda_1 + \lambda_2)/2 + (\lambda_1 - \lambda_2)/2$, $x_3 = (\varphi_1 + \varphi_2)/2 + (\varphi_1 - \varphi_2)/2$ интеграл (1) превращается в интеграл по кубу:

$$f\sigma\iiint_{\Omega} f(X)dx = f\sigma\iiint_{G} g(t)dt \qquad (2),$$

где $G = \{-1 \le t_1 \le 1,\ -1 \le t_2 \le 1,\ -1 \le t_3 \le 1\}$, для вычисления которого используются кубатурные формулы:

$$\iiint_{G} g(t)dt \approx Q_q(g), \text{ где } q = 1, 2, 3 \qquad (3).$$

$$Q_1 = \frac{8}{225}\left[44g(0,0,0) + \frac{121}{8}\sum_{|i|,|j|,|k|=1} g\left(i\sqrt{\frac{5}{11}}, j\sqrt{\frac{5}{11}}, k\sqrt{\frac{5}{11}}\right) + 10\sum_{|i|+|j|+|k|=1} g(i,j,k)\right],$$

$$Q_2 = \frac{8}{1225}\left[-\frac{1552}{5}g(0,0,0) + \frac{1573}{40}\sum_{|i|,|j|,|k|=1} g\left(i\sqrt{\frac{5}{11}}, j\sqrt{\frac{5}{11}}, k\sqrt{\frac{5}{11}}\right)\right.$$
$$\left. + \frac{784}{5}\sum_{|i|+|j|+|k|=1} g\left(i\sqrt{\frac{5}{14}}, j\sqrt{\frac{5}{14}}, k\sqrt{\frac{5}{14}}\right) + 15T\right],$$

$$T = \sum_{[i],[j]=1} g(i,j,0) + \sum_{[i],[k]=1} g(i,0,k) + \sum_{[j],[k]=1} g(0,j,k),$$

$$Q_3 = {}^{4}/_{9}\, Q_1 + {}^{5}/_{9}\, Q_2.$$

Формулы Q_1 и Q_2 являются точными для всех многочленов со степенью $s \le 5$, формула Q_3 точна для всех многочленов при $s \le 7$. Следует заметить, что при вычислении по формулам Q_1 и Q_2 частично используются одни и те же значения аргументов t, что заметно снижает вычислительные затраты.

В созданном авторами алгоритме для вычисления V_R первоначально область G разбивается на 64 куба и осуществляется вычисление интегралов по формулам $Q_1(g)$ и $Q_2(g)$. При выполнении условия

$$\left| 2[Q_1(g) - Q_2(g)] / [Q_1(g) + Q_2(g)] \right| \le 0.01\% \qquad (4)$$

за приближенное значение интеграла принимается значение, вычисленное по формуле Q_3, являющейся линейной комбинацией формул Q_1 и Q_2. Если условие (4) не выполняется, то каждый куб разбивается на 2^3 равных кубов и данный алгоритм применяется к каждому из этих кубов. Процесс деления продолжается до тех пор, пока условия (4) не будет выполнено. Результаты выполненных вычислительных экспериментов свидетельствуют, что число кубов при вычислении гравитационного эффекта от любого СП может быть ограничено величиной $64^3 = 262144$.

В таблице приведены результаты модельного эксперимента: вычисление V_R для объекта, ограниченного координатами $50° \le \varphi \le 50.5°$, $40° \le \lambda \le 40.2°$ и глубинами оснований 5 км и 25 км, обладающего избыточной плотностью 0.2 г/см^3, на сферической Земле в 625 точках квадратной сети размером 0.1°×0.1°. Отметим, что максимальная амплитуда поля V_R составляет примерно 53.6 мГал. Для расчета применялись составные формулы прямоугольников, трапеций, парабол (Симпсона) и представленный выше алгоритм. Для перечисленных методов Ньютона-Котеса использовался переменный шаг интегрирования k, последовательно уменьшающейся в 2 раза. Число узлов интегрирования N изменялось в зависимости от модуля разности интегралов $\varepsilon = |\mathrm{I}(k) - \mathrm{I}(k/2)|$ и составляло 2^{12}–2^{24}. Максимальное количество N вычисляемых значений функции $g(t)$ не превышало 33×2^{18}.

Таблица. Параметры точности и скорости вычислений

Формула	Среднее N	Среднее ε, мГал	Сред. относит. погрешность (4), %	Время счета, с
Прямоугольников	85126	0.00017	0.02	5
Трапеций	128024	0.00024	0.03	9
Парабол	35937	0.000018	0.0003	1
Кубатурный алгоритм (3)	2727	0.000016*	>0.01	>0.1**

Примечания: *1). расчет параметра ε^* выполнялся для приближенных интегралов Q_1 и Q_2; 2). оценка времени счета** является весьма приближенной, т.к. проведена на основе полученных значений N для различных формул численного интегрирования.*

Как очевидно, в данном случае наилучшие результаты получены с применением предлагаемого кубатурного алгоритма, а наиболее трудоемким во всех случаях является вычисление гравитационного эффекта вблизи возмущающего объекта (рис. 2). Следует добавить, что реальная точность вычислений ε параметра V_R по формуле Q_3 будет несколько выше, чем указано в таблице, где приведены оценки (4).

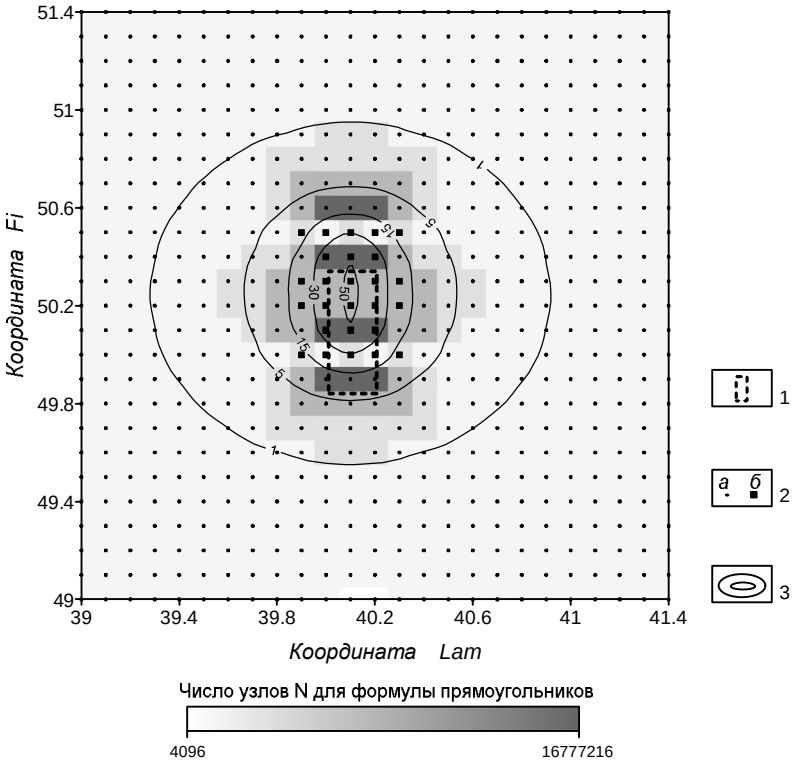


Рис. 3. Модельный пример:
1–сферический параллелепипед;
2–точки расчета гравитационного поля (число разбиений *G* на кубы: *а*– 64, б–512);
3–изоаномалы V_R, мГал

Рассмотренный выше адаптивный кубатурный алгоритм и реализующее его программное обеспечение может эффективно использоваться при решении многих практических задач гравиметрии, в т.ч. для вычисления поправок за влияние рельефа местности на сферической Земле.

Литература

1. *Страхов В.Н.* Разрешение господствующего стереотипа мышления – главнейшая задача в развитии теории и практики интерпретации потенциальных полей (гравитационных и магнитных аномалий) в начале XXI века. М.: ОИФЗ РАН. 2000. 44 с.

2. *Сеначин В.Н., Лютая Л.М., Сеначин М.В.* Некоторые вопросы гравитационного моделирования на сферической поверхности Земли. //Вестник ДВО РАН. 2015. №2. С. 43-48.

3. *Долгаль А.С., Симанов А.А., Хохлова В.В.* Алгоритмы приближенного решения прямой задачи гравиметрии на сферической земле // Материалы Международной научно-практической конференции «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики» (г. Пермь, 21-22.11.2014 г.) – Пермь, Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2014. – С. 96-101.

4. *Пятаков Ю.В., Исаев В.И.* Методы решения прямых задач гравиметрии. //Известия Томского политехнического университета. 2012. №1. Т. 320. С. 105-110.

5. *Фихтенгольц Г.М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: Физматгиз. 1963. 656 с.

6. *Старостенко В.И., Манукян А.Г.* Решение прямой задачи гравиметрии на шарообразной Земле. //Физика Земли. 1983. №12. С. 34-50.

7. *Страхов В.Н.* О проблеме решения прямых задач гравиметрии и магнитометрии для материально стержня с полиномиальной плотностью. //Геофизический журнал. 1985. Т.7. №5. С. 3-9.

8. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 2000. 622 с.

УДК 550.834.3(571.1)

К ВОПРОСУ О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА ИНФОРМАЦИИ О СТРОЕНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПРИ РЕГИОНАЛЬНОМ ГЕОКАРТИРОВАНИИ И ДЛЯ ПРОГНОЗА МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ В УРАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

В.С. Дружинин, В.Ю. Осипов, Н.И. Начапкин*, druvs@mail.ru,*
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена 100, Россия

Аннотация. Рассмотрен вопрос о необходимости учета информации о строении земной коры при решении региональных задач геокартирования и минерагении на основе впервые созданной объемной геолого-геофизической модели и схемы тектонического районирования Уральского региона.

TO QUESTION OF NEED ACCOUNTING INFORMATION ABOUT STRUCTURE CRUST FOR REGIONAL MAPPING AND FORECAST FIELDS OF HYDROCARBONS IN THE URAL REGION

V.S. Druzhinin, V.Y. Osipov, N.I. Nachapkin*, druvs@mail.ru,*
Institute of Geophysics Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IGF UB RAS)
620016, Amundsen str. 100, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Question about need of accounting information on crust structure at solution of regional problems, mapping and minerageny on basis of first time created of geologic-geophysical volume model and scheme of tectonic division into districts of the Ural region is considered.

Региональные особенности тектоники, магматизма и минерагении приповерхностных структур связаны со спецификой строения земной коры. Вначале это было установлено результатами профильных исследований ГСЗ, проводимых Баженовской геофизической экспедицией при участии Института геофизики УрО РАН; более отчетливо эти отношения проявились при сравнении составленных объемных геофизических моделей земной коры и геологических карт и схем [1, 5]. Наличие таких связей указывает на решающую роль глубинных процессов при формировании современного образа геологической среды Уральского региона, созданного в процессе многократной тектономагматической активизации.

К сожалению, в господствующих в геологии на протяжении полувека мобилистических воззрениях на тектонику, большой объем информации в «до ОГТ-шное» время практически игнорируется. Но достоверность глубинных сейсмических разрезов ОГТ, в частности, относительно крупномасштабных пологих глубинных надвигов и новых схем тектонического районирования сомнительна. На это же указывают результаты сверхглубокого и глубокого параметрического бурения.

В докладе рассмотрен ряд примеров по Уралу и прилегающих территорий, приводимых для обоснования необходимости учета достаточно обширной информации о строении земной коры Уральского региона на стадии регионального геокартирования и составления карт прогноза полезных ископаемых, в первую очередь углеводородов в глубокопогруженных горизонтах на территориях нефтегазовых провинций Уральского региона.

Район Уральской сверхглубокой скважины СГ-4.

Он достаточно изучен глубинными сейсмическими зондированиями (рис. 1). Часть этой информации, полученной до начала бурения СГ-4 была использована одновременно с результатами геологической съемки М 1:50 000, при составлении объемной геолого-геофизической модели по району СГ-4 и проектного разреза по скважине до глубины Н=13

км. Основная часть материалов ГСЗ впоследствии была использована в качестве опорной при анализе сейсмической информации по Среднему сегменту Урала и создании геолого-геофизической модели земной коры [2].

Отметим важные особенности составленной проектной модели, подтвержденные сверхглубоким бурением: увеличенная мощность Имменовского комплекса (свыше 4,5 км); значение физических параметров; сложная тектоническая обстановка, особенно в интервале ~6,0 км. Предполагалось, что помимо разломов и нарушений уральского направления, вероятно, присутствуют в интервале глубин ~6,0±0,5 км элементы Кушвинско-Баранчинской субширотной дислокации, расположенные южнее Красноуральского профиля ГСЗ.

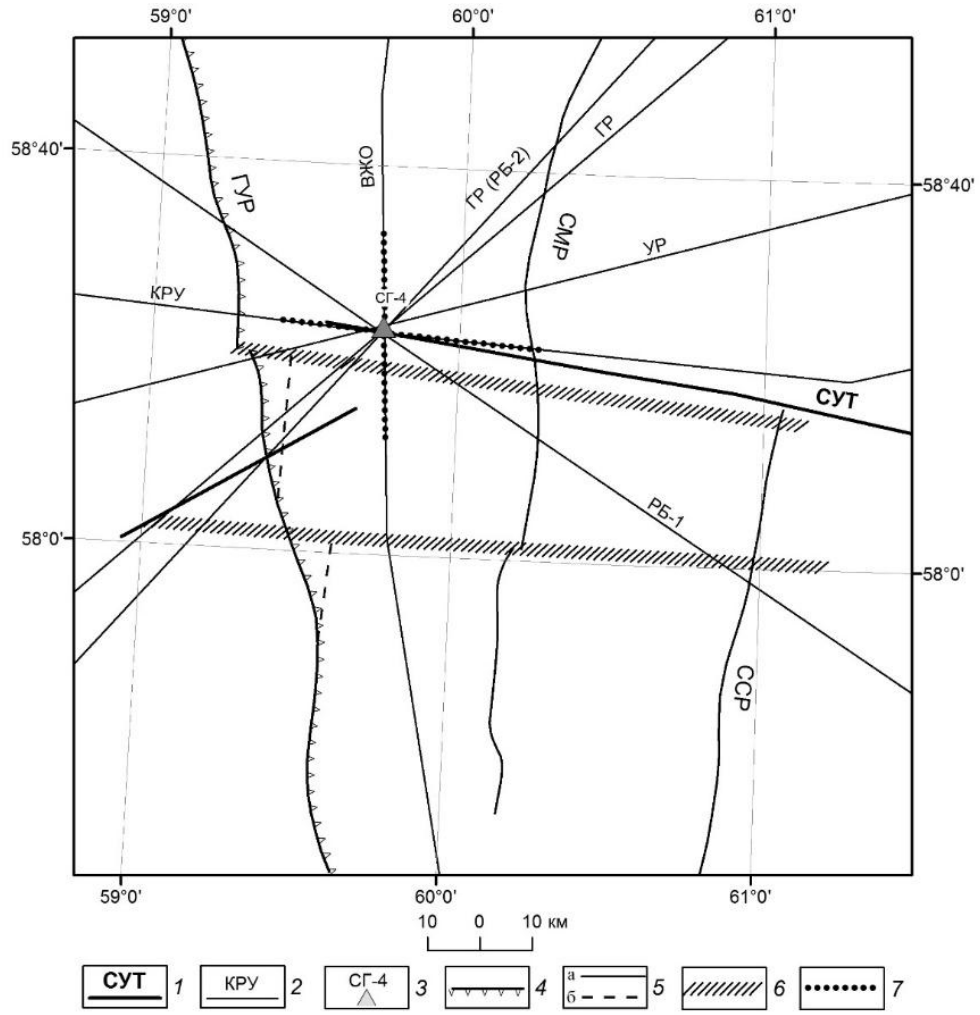


Рис. 1. Схема расположения профилей ГСЗ, МПВ и ОГТ в районе СГ-4

Условные обозначения: *1* – Среднеуральский трансект ОГТ (СУТ); *2* – геотраверсы и профили ГСЗ, МОВЗ: Центра "ГЕОН": РБ-1 (Рубин-1), РБ-2 (Рубин-2), УР (Уральский МОВЗ); Баженовской геофизической экспедиции при участии Института геофизики УрО РАН: ГР (Гранит), КРУ (Красноуральский), ВЖО (Вижай-Орск); *3* – Уральская сверхглубокая скважина СГ-4; *4* – Главный Уральский разлом; *5* – региональные разломы по геологической съемке (а): СМР – Серовско-Маукский, ССР – Сысертский; возможное положение ГУР с учетом сдвиговой тектоники (б); *6* – предполагаемые субширотные дислокации; *7* – детализационные наблюдения МПВ, МОВ.

На втором этапе исследований Баженовской геофизической экспедицией выполнены в рамках международного проекта ЕВРОПРОБА наблюдения методом глубинного ОГТ в три стадии; в районе СГ-4 они представлены двумя разрозненными звеньями [6, 7]. При составлении сейсмогеологического разреза по Среднеуральскому трансекту (СУТ) были проигнорированы результаты выше указанных исследований ГСЗ, например, такие как

трехмерность геологической среды и возможное нахождение СУТ в зоне субширотной дислокации. Это обусловило сложный рисунок разреза, показанного разрозненными скоплениями сейсмических элементов, невыясненной природы, позволяющих даже по предложенному авторами разрезу составить иной тектонический образ среды (рис. 2). И второе, западная часть Тагильского прогиба представлена Серебрянским отрезком СУТ, расположенным по геологической карте на юго-востоке относительно основного направления. Смещение западной границы прогиба, возможно, происходит по левостороннему сдвигу, приуроченному к зоне субширотной дислокации. В таком случае показанный на разрезе СУТ широкомасштабный глубинный надвиг недостаточно обоснован совокупностью имеющихся экспериментальных данных.

Район Полярно-Уральского трансекта (ПУТ).

В работе [3, 4] рассмотрены особенности строения земной коры в Полярно-Уральском секторе. При составлении сводного сейсмогеологического разреза привлечены результаты комплексных сейсмических наблюдений по Полярно-Уральскому трансекту; на западе - сейсмогеологические разрезы по геотраверсам АГАТ-2 и Купянск–Воркута, составленные в процессе обобщения материалов ГСЗ и создания объемной геолого-геофизической модели [5].

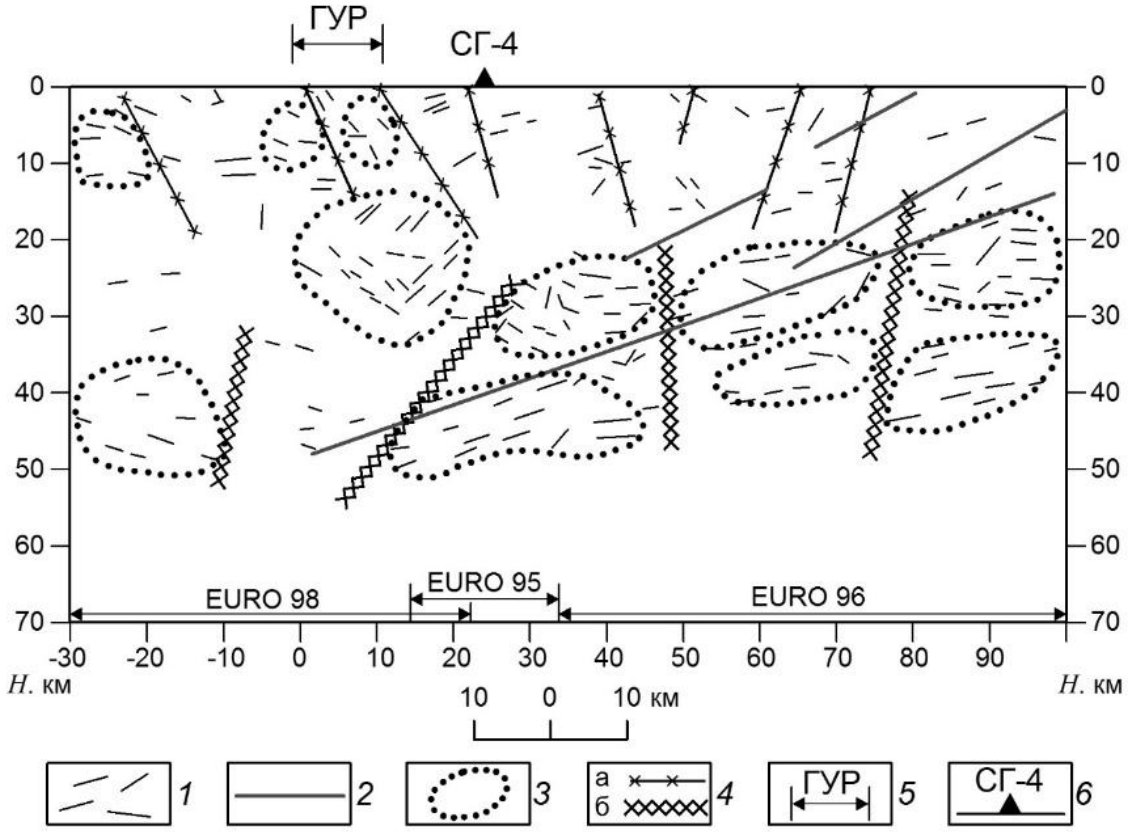


Рис. 2. Фрагмент сейсмического разреза ОГТ вдоль Среднеуральского трансекта с элементами интерпретации из работы [6, 7]

Условные обозначения: *1* – сейсмические элементы; *2* – звенья полого глубинного надвига согласно интерпретации [7]; вариант интерпретации сейсмического разреза (*3–4*): *3* – контуры участков скопления сейсмических элементов, 4 – разломы в верхней (а) и нижней (б) частях земной коры; *5* – положение Главного Уральского разлома; *6* – Уральская сверхглубокая скважина.

Для определения природы обширной области высокой электропроводимости, выделенной в земной коре на востоке ПУТ, соответствующей, по предположению авторов [8] флюидонасыщенной области, была пробурена Янгиюганская параметрическая скважина, которая вскрыла ниже промежуточного комплекса породы консолидированного фундамента

на интервале ~2,2 км, представленные гранито-гнейсовыми типичными по составу и возрасту породами Восточно-Уральского поднятия, в котором согласно выполненному тектоническому районированию [5] она и находится.

Характер сейсмического разреза ОГТ подобен разрезу по Средне-Уральскому трансекту, поскольку он также расположен в субширотной зоне дислокации земной коры, хотя находится в существенно отличной структурно-тектонической обстановке. Выделение крупномасштабных и пологих надвигов по всей толще земной коры как это сделано в работе [6] в данном случае также проблематично (рис. 3).

Другим важным вопросом является глубинное районирование земной коры и ее соотношение с поверхностными структурами. Согласно авторской интерпретации разреза ОГТ по ПУТ восточная часть приходится на Западно-Сибирскую плиту; на составленном сводном разрезе (Салехардский профиль ГСЗ) она попадает на Восточные мегазоны Уральской складчатой системы, которые перекрыты осадочным комплексом мезо-кайнозоя. Тагильский прогиб сохраняет типичные для данной структуры черты глубинного строения и соответственно имеет ограниченный углеводородный потенциал недр. Подтверждение этому является отсутствие положительных результатов разведочно-поисковых работ, несмотря на обилие благоприятных структурных форм [3].

Ряд примеров по Ново-Портовскому району, Ереминской, Тавдинской и Казым-Полуйской площадей Приуральской области подчеркивает, что при геокартировании домезозойского основания Западно-Сибирской геосинеклизы (ЗСГС) следует учитывать информацию о строении земной коры, которая представлена для Приуральской области ЗСГС схемой тектонического районирования кристаллической коры. Это позволит определить положение региональных геологических структур, разделяющих их глубинных разломов и субширотных дислокаций осадочного чехла.

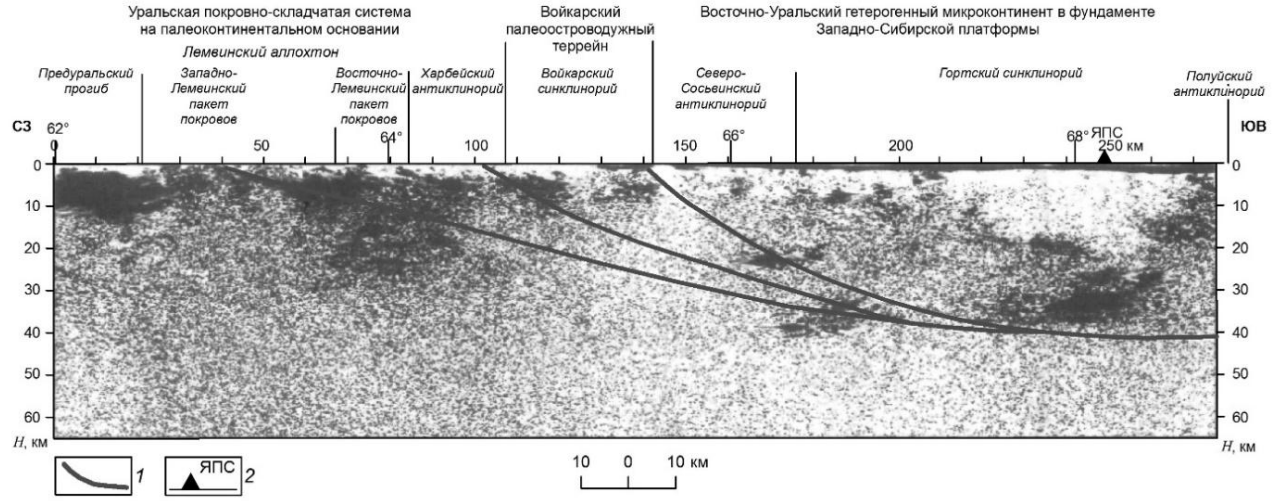


Рис. 3. Сейсмический разрез по профилю Полярно-Уральский трансект по данным МОГТ [6]

Условные обозначения: *1* – элементы сдвиговой тектоники; *2* – Янгиюганская параметрическая скважина.

Важное значение приобретает уменьшение степени неоднозначности информации о глубинном строении. В Уральском регионе она была решена применением разработанных технологий сейсмогеокартирования и создания объемных геолого-геофизических моделей верхней части литосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 14-27-00059.

Литература

1. *Дружинин В.С., Соболев И.Д., Рыбалка В.М.* Связь тектоники и магматизма с глубинным строением Среднего Урала по данным ГСЗ. М.: Недра. 1976. 158 с.
2. *Дружинин В.С., Каретин Ю.С., Автонеев С.В., Рыжий Б.П.* Геолого-геофизическая модель земной коры района Уральской сверхглубокой скважины // ДАН России, 1993. Т. 333. № 4. С. 507–511.
3. *Дружинин В.С., Мартышко П.С., Начапкин Н.И., Осипов В.Ю., Брехунцов А.М., Монастырев Б.В., Нестеров И.И., Огнев Д.А.* Схема тектонического районирования и оценка нефтегазоперспективности Ново-Портовско-Салехардского района Западно-Сибирской геосинеклизы // Отечественная геология, 2014. № 6. С. 24–31.
4. *Дружинин В.С., Ракитов В.А., Осипов В.Ю., Начапкин Н.И., Недядько В.В.* Строение земной коры Полярного сектора Уральской складчатой системы по данным ГСЗ // Геология и геофизика, 2014. Т. 55. № 3. С. 498–505.
5. *Дружинин В.С., Мартышко П.С., Начапкин Н.И., Осипов В.Ю.* Строение верхней части литосферы и нефтегазоносность недр Уральского региона. Монография. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2014. 226 с.
6. *Костюченко С.Л., Морозов А.Ф., Кременецкий А.А.* Тимано–Урало–Пайхойская коллизионная область. М.: Геокарт-ГЕОС, 2012. 210 с.
7. *Рыбалка А.В., Кашубина Т.В., Петров Г.А., Кашубин С.Н.* Среднеуральский трансект: новые данные по глубинному строению Урала. // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования. Материалы Международного научно-практического семинара (18–20 сентября, 2007). СПб: ВСЕГЕИ, 2007. С. 186–191.
8. *Рыбалка А.В., Петров Г.А., Кашубина Т.В., и др.* Глубинное строение Урала по данным Полярно-Уральского трансекта // Региональная геология и минерагения, 2011. № 48. С. 25–36.

УДК 525.233+ 550.312 (550.83)

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ УТОЧНЕНИЯ ФИГУРЫ ЗЕМЛИ ПО ЗНАЧЕНИЯМ ПОТЕНЦИАЛА ПРИТЯЖЕНИЯ В ОГРАНИЧЕННОЙ ОБЛАСТИ

Ю.И. Дубовенко, *nemishayeve@ukr.net*
Институт геофизики НАН Украины, г. Киев, Украина

Невзирая на успехи в определении уклонения отвеса по спутниковым и наземным данным гравиметрии, не решены вопросы разрешимости граничных задач для определения превышений локальных участков геоида по данным силы тяжести.
Для приближения участков геоида предложена модификация метода Молоденского, которая позволяет определять пространственное распределение превышений геоида, аппроксимируя их точечными источниками по данным потенциала притяжения, заданным в ограниченной области. Определены соответствующие аналитические конструкции для силы тяжести, потенциала притяжения, аномалий высот геоида.
Поставлена граничная задача последовательного уточнения рельефа геоида по данным потенциала притяжения в ограниченной области. Для её решения средствами функционального анализа получено интегральное уравнение силы тяжести. Исходя из него, при ряде допущений относительно ориентации векторов реальной и нормальной силы тяжести получены аналитические аппроксимации для описания аномалий высот геоида и уточнения фигуры Земли – в виде линейного интегрального уравнения 1-го рода.
Исходя из приближений потенциала притяжения, определены высоты геоида в виде линейной граничной задачи с граничными условиями в виде нелинейного функционала над банаховым пространством области наблюдений. Она сведена к линейному интегральному уравнению 1-го рода для потенциала притяжения – уравнению фигуры Земли. Предложен итерационный алгоритм для вычисления приближений потенциала притяжения. Доказана сходимость последовательных итерационных приближений фигуры Земли. Эта сходимость считается доказательством существования решения в численном виде. Устойчивость вычислений обеспечивает применение способа Сизикова для численного решения интегральных уравнений 1-го рода.

ON A CERTAIN APPROACH FOR EARTH FIGURE DEFINITION BY THE VALUES OF ATTRACTION POTENTIAL WITHIN THE RESTRICTED AREA

Yu.I. Dubovenko, *nemishayeve@ukr.net*
Institute of Geophysics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

In spite of the success in determining of plumb deviation by the satellite and ground gravity data there are not resolved the questions of solubility of boundary value problems for the determination of elevation of local geoid areas according to the gravity.
In order to approximate the geoid areas we propose the modification of Molodenskii approach which allow to determine the spatial distribution of the geoid elevations. The last ones were approximated by the point sources by the values of the attraction potential given in a limited domain. The appropriate analytical constructions for the gravity, the attractive potential, anomaly geoid heights are defined.
The boundary value problem of the successive specification of the geoid relief by the values of the attraction potential within a limited domain is formulated. For its solution by means of functional analysis, we deduce an integral equation of gravity. Proceeding from it, in a number of assumptions about the orientation of vectors of the real and normal gravity we derive the analytical approximations to describe the anomalies of geoid heights and correction of the Earth figure – in the form of a linear integral equation of first kind.
Based on the approximation of the attractive potential, we determine the geoid heights as a linear boundary value problem with the boundary conditions in the form of non-linear functional on Banach domain of observations area. The problem is reduced to a linear integral equation of the

first kind for attraction potential – to the equation of the Earth figure. We propose an iterative algorithm for calculation of the approximations of attraction potential. The convergence of the successive iteration in the shape of the Earth approximations is proved. The convergence we consider as prove of numerical solution existence. A stability calculation is provided by the application of the Sizikov approach for numerical solution of 1-st kind integral equations.

Введение. Невзирая на успехи в определении уклонения отвеса (отклонения поверхности геоида от сфероида) как по спутниковым [1], так и наземным данным [2] гравиметрии, остаются нерешёнными многие вопросы теоретического обоснования соответствующих методов, и в частности, о корректной постановке и разрешимости граничных задач для определения превышений геоида над земным эллипсоидом в различных системах отсчёта. Исходя из того, что поверхность геоида под сушей не поддаётся математической формализации, и лишь приближённо описывается квазигеоидом Молоденского, и вследствие динамического изменения поверхности геоида после крупных землетрясений и значительных тектонических движений, не теряет актуальности разработка новых способов определения локальных участков фигуры Земли по данным силы тяжести [3].

Альтиметрические методы уточнения структуры геоида [4] хорошо описывают участки морской поверхности, но имеют ограниченную точность над сушей вследствие снижения точности определения сферических гармоник на высоких степенях разложения в ряд по сферических функциях. Кроме того, в модели [1], полученной этими методами нет надлежащего учёта сферически несимметричной части глобального поля силы тяжести вдоль оси вращения планеты (её надлежит учитывать точечными источниками).

Для приближения участков геоида, по крайней мере, его высокочастотной области, можно применить некоторую модификацию метода Молоденского, которая позволяет определять пространственное распределение превышений геоида, аппроксимируя их точечными источниками по данным потенциала притяжения, заданным в ограниченной области. Исследование соответствующих аналитических конструкций предлагается вашему вниманию**1. Потенциал притяжения** $V(x)$**.** Пусть на гладкой поверхности ∂G, разделяющей ограниченную G^- и неограниченную G^+ части области G, заданы значения силы тяжести:

$$\tilde{g}(x)=\frac{\partial W(x)}{\partial \bar{n}(x)},\ \bar{n}(x)\perp\partial G_W=\{x: W(x)=C\}. \tag{1}$$

Пусть в области G^- определён центр тяжести в начале неподвижной системы декартовых прямоугольных координат $Ox_1x_2x_3$ (ее ограничения определим позже). Если область G^- вращается вокруг оси Ox_3 с постоянной угловой скоростью $\omega=|\bar{\omega}|$, то значения $g(x)$ силы тяжести на ∂G равны:

$$g(x)=\tilde{g}(x)-\omega^2\left(x_1\cos(\bar{n},x_1)+x_2\cos(\bar{n},x_2)\right),\ x\in\partial G. \tag{2}$$

Определённые по (2) значения $g(x)$ будут некоторым приближением $|gravV(x)|$, где $V(x)=W(x)-\Omega(x)$, $W(x)$ – потенциал силы тяжести, $\Omega(x)$ – центробежный потенциал, ибо нормали $\bar{n}(x)\perp\partial G_W$ и $\bar{n}_0(x)\perp\partial G_V$, где $\partial G_V=\{x: V(x)=c\}$, не совпадают. Однако мы можем пренебречь этим, считая что $(\bar{n}(x),\bar{n}_0(x))=0$.

Ставя задачу – определить по граничным данным (2) потенциал притяжения в виде

$$V(x)=\frac{1}{4\pi}\int_{\partial G}\frac{\mu(\xi)}{r(x,\xi)}d\sigma_\xi,\ x\in\bar{G}^+, \tag{3}$$

в итоге получаем для $\forall\, x\in G^+$ уравнение силы тяжести:

$$g(x)=\frac{1}{16\pi^2}\int_{\partial G}\int_{\partial G}\frac{\mu(\xi)}{r^2(x,\xi)}\frac{\mu(\eta)}{r^2(x,\eta)}\cos(\bar{\xi},\bar{\eta})d\sigma_\xi d\sigma_\eta. \tag{4}$$

На его основании после ряда функциональных преобразований получаем *нелинейное*

интегральное уравнение для определения плотности $\mu(\xi),\ \xi \in \partial G$ в виде:

$$\frac{3}{4}\mu^2(x)+\frac{1}{16\pi^2}\int\limits_{\partial G}\int\limits_{\partial G}\frac{\mu(\xi)}{r^2(x,\xi)}\frac{\mu(\eta)}{r^2(x,\eta)}\cos(\bar{\xi},\bar{\eta})d\sigma_\xi d\sigma_\eta = g(x),\ x \in \partial G\,. \tag{5}$$

Определив в выражении (5) функцию $\mu(\xi),\ \xi \in \partial G$, можем вычислить потенциал $V(x),\ x \in S(\xi,R)$ по формуле (3).

Все вычисления можно проводить при условии, что значения $g(x)$ определены. Но, мы не знаем величин направляющих косинусов $\cos(\bar{n}(x),x_i),\ i=\overline{1,3}$ внутренней для области G^- нормали $\bar{n}(x)$ и, следовательно, не можем определить точно и сами значения $g(x)$.

Положим на первом этапе

$$\cos(\bar{n}_0(x),x_i)=\cos(\bar{\rho},x_i), \tag{6}$$

и выполним необходимые вычисления. В результате получим приближенные значения потенциала притяжения $V^{(0)}(x),\ x \in S(\xi,R)$.

2. Аномалии высот геоида $\xi(\varphi,\lambda)$**.** В разных точках пространства расстояние между эквипотенциальными поверхностями различно, в соответствии с различными значениями силы тяжести. Для придания физического смысла превышению одной точки поверхности ∂G над другой её точкой, например, *B* над *A*, или *C* над *A* (рис. 1), определим высоты в виде

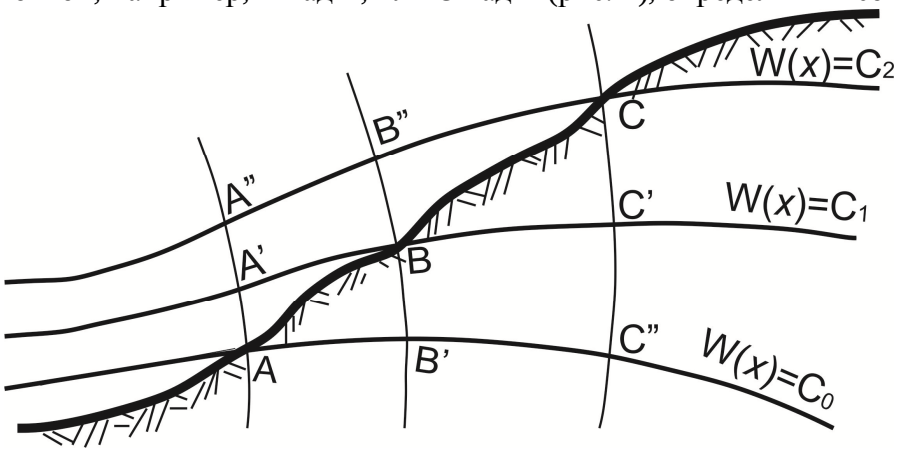


Рис. 1. Расхождение векторов реальной и нормальной силы тяжести при определении аномалий высот.

$$H_0(\varphi,\lambda)=\frac{1}{g_m(\varphi,\lambda)}\int\limits_{(AC)} g\cdot dh\,, \tag{7}$$

где интегрирование “нивелирных превышений” dh ведётся в поле силы тяжести вдоль силовой линии $CC'C''$, $g_m(\varphi,\lambda)$ – среднее значение силы тяжести на отрезке $CC'C''$. Так как величины $g_m(\varphi,\lambda)$ мы не знаем, вместо выражения (7) приходится вычислять следующее

$$H_\gamma(\varphi,\lambda)=\frac{1}{\gamma_m(\varphi,\lambda)}\int\limits_{(AC)} g\cdot dh\,, \tag{8}$$

где $\gamma_m(\varphi,\lambda)$ – среднее значение нормальной силы тяжести, т.е., значение γ_m в точке (φ,λ) при $H=0.5H_\gamma(\varphi,\lambda)$. Разность $H_0(\varphi,\lambda)-H_\gamma(\varphi,\lambda)$ будет отображать аномалию высоты

$$\xi(\varphi,\lambda)=H_0(\varphi,\lambda)-H_\gamma(\varphi,\lambda)=\frac{\gamma_m(\varphi,\lambda)-g_m(\varphi,\lambda)}{g_m(\varphi,\lambda)\cdot\gamma_m(\varphi,\lambda)}\int\limits_{(AC)} g\cdot dh\,. \tag{9}$$

Аномалии высот $\xi(M)$ определяют по методам Стокса-Пуанкаре и Молоденского из линейной граничной задачи для уравнения Лапласа с граничными условиями для искомой функции $T(M)$, задаваемыми в виде

$$\alpha(N)T(N)+\beta(N)\frac{\partial T(N)}{\partial \bar{\nu}(N)}=g(M)-\gamma(N),$$

где M – неизвестная точка земной поверхности с высотой H_0, N – точка земной поверхности с высотой H_γ, $\alpha(N) = -\dfrac{1}{\gamma(N)}\dfrac{\partial\gamma(N)}{\partial\nu(N)}$, $\beta(N) \equiv 1$.

Но указанное соотношение нецелесообразно для практического применения. Его можно упростить, сделав ряд допущений, в частности, о представлении потенциала силы тяжести в виде $W(M) = U(M) + T(M)$, и $\cos(n,\nu) \approx 1$, где $U(M)$ – нормальный потенциал, $T(M)$ – возмущающий потенциал, $\nu(M)$ – внутренняя нормаль к уровню потенциала $U(M) = C$. Тогда будем иметь соотношение

$$\frac{1}{\gamma(N)}\frac{\partial\gamma(N)}{\partial\nu(N)}\cdot T(N) + \frac{\partial T(N)}{\partial\nu(N)} = g(M) - \gamma(N). \tag{10}$$

Если бы поверхность Земли с ортометрическими высотами H_0 находилась вне гипсометрической поверхности Σ, определяемой нормальными высотами H_γ, то решение $\xi(M) = T(M)/\gamma(M)$, $M \in \partial G$ задачи было бы гарантированно точное. Но для этого, как следует из выражения (9), нужно $\xi(M) > 0$. А это условие не связано с граничным условием (10) и для его обеспечения придётся менять (10), т.е., решать другую граничную задачу.

Определим решение исходной задачи (2-5).

3. Определение рельефа $\rho(\varphi,\lambda)$**.** Нам известно приближенное значение потенциала $V^{(0)}(x) = \dfrac{1}{4\pi}\int\limits_{\partial G}\dfrac{\mu(\xi)}{\gamma(x,\xi)}d\sigma_\xi$. Введём замену вида

$$x_1 = R\sin\varphi_0\cos\lambda_0,\ x_2 = R\sin\varphi_0\sin\lambda_0,\ x_3 = R\cos\varphi_0,$$
$$\xi_1 = \rho\sin\varphi\cos\lambda,\ \xi_2 = \rho\sin\varphi\sin\lambda,\ \xi_3 = \rho\cos\varphi.$$

Вычислим функционал:

$$I^2(\rho,\varphi,\lambda) = \left[\frac{\partial(\xi_2,\xi_3)}{\partial(\varphi,\lambda)}\right]^2 + \left[\frac{\partial(\xi_3,\xi_1)}{\partial(\varphi,\lambda)}\right]^2 + \left[\frac{\partial(\xi_1,\xi_2)}{\partial(\varphi,\lambda)}\right]^2.$$

Найдя соответствующие частные производные, получим

$$I^2(\rho,\varphi,\lambda) = \rho^2\left\{\rho^2\sin^2\varphi + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\varphi}\right)^2\sin^2\varphi + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\lambda}\right)^2\right\} = \rho^2\left\{\left[\rho^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\varphi}\right)^2\right]\sin^2\varphi + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\lambda}\right)^2\right\},$$

и, следовательно, $d\sigma_\xi = \sqrt{\left[\rho^2 + \left(\dfrac{\partial\rho}{\partial\varphi}\right)^2\right]\sin^2\varphi + \left(\dfrac{\partial\rho}{\partial\lambda}\right)^2}\,d\varphi d\lambda$, $\partial G = \{0 \le \varphi \le \pi,\ 0 \le \lambda \le 2\pi\}$.

Таким образом, задача (2-5) получила граничные условия в виде нелинейного функционала над пространством $C^{(1,\alpha)}(\partial G)$, непрерывного и дифференцируемого при $\rho < R$:

$$V^{(0)}(R,\varphi_0,\lambda_0) = \frac{1}{4\pi}\int\limits_{\partial G} f\left(\rho,\frac{\partial\rho}{\partial\varphi},\frac{\partial\rho}{\partial\lambda}\right)d\varphi d\lambda, \tag{11}$$

где $f\left(\rho,\dfrac{\partial\rho}{\partial\varphi},\dfrac{\partial\rho}{\partial\lambda}\right) = \dfrac{\mu(\rho,\varphi,\lambda)\rho\sqrt{\left[\rho^2 + \left(\dfrac{\partial\rho}{\partial\varphi}\right)^2\right]\sin^2\varphi + \left(\dfrac{\partial\rho}{\partial\lambda}\right)^2}}{\sqrt{R^2 + \rho^2 - 2R\rho\cos\psi}}$, $\rho = \rho(\varphi,\lambda)$,

$\cos\psi = \cos\varphi\cos\varphi_0 + \sin\varphi\sin\varphi_0\cos(\lambda - \lambda_0)$.

После ряда аналитических преобразований получим разность потенциала притяжения

$$\Delta V(\chi,\rho) = \frac{1}{4\pi}\int\limits_{\partial G}\left(\frac{\partial f}{\partial\rho} - \frac{\partial^2 f}{\partial\varphi\partial u} - \frac{\partial^2 f}{\partial\lambda\partial v}\right)m d\varphi d\lambda.$$

Отсюда легко получить *линейное* интегральное уравнение 1-го рода для искомой функции

$$\int_{\partial G} K(x,\xi_n)\rho_{n+1}(\varphi,\lambda)d\varphi d\lambda = \tau(x),\ x \in S(\xi,R), \tag{12}$$

где $m = \rho_{n+1} - \rho_n$, $K(x,\xi_n) = \dfrac{1}{4\pi}\left(\dfrac{\partial f(\rho_n)}{\partial\rho} - \dfrac{\partial^2 f(\rho_n)}{\partial\varphi\partial u} - \dfrac{\partial^2 f(\rho_n)}{\partial\lambda\partial v}\right)$,

$$\tau(x) = V^{(0)}(x) - \frac{1}{4\pi}\int_{\partial G} f\left(\rho_n, \frac{\partial\rho_n}{\partial\varphi}, \frac{\partial\rho_n}{\partial\lambda}\right)d\varphi d\lambda + \int_{\partial G} K(x,\xi_n)\rho_n(\varphi,\lambda)d\varphi d\lambda,$$

$$\frac{\partial\mu}{\partial\rho} = \frac{\partial\mu}{\partial\varphi}\cdot\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} + \frac{\partial\mu}{\partial\lambda}\cdot\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} = \frac{\partial\mu}{\partial\varphi}\cdot\frac{1}{\dfrac{\partial\rho}{\partial\varphi}} + \frac{\partial\mu}{\partial\lambda}\cdot\frac{1}{\dfrac{\partial\rho}{\partial\lambda}}.$$

Вычислив $V^{(i)}\left(x^{(i)}\right)$, $i = 0,1,2,\ldots$, определим по формуле (12) значение $\rho_{n+1}^{(i)}(\varphi,\lambda)$ и затем в точках этой поверхности $\partial G^{(i)}$ – направляющие косинусы $\cos\left(n^{(i)}(x), x_j^{(i)}\right)$, $j = 1,2,3$. Далее находим следующее приближение граничного условия (2) для отыскания потенциала $V^{(i+1)}\left(x^{(i)}\right)$, $i = 0,1,2,\ldots$ и т.д.

Вводя обозначения:

$$\rho_{n+1} = \rho_n + m_n,\ W_n = (\rho_n, u_n, v_n),\ u_n = \frac{\partial\rho_n}{\partial\varphi},\ v_n = \frac{\partial\rho_n}{\partial\lambda},\ \alpha = (R,\varphi_0,\lambda_0) \in \partial S,\ \beta = (\rho,\varphi,\lambda) \in \partial G,$$

$$\partial G = \left\{\langle\varphi,\lambda\rangle : 0 \le \varphi \le \pi;\ 0 \le \lambda \le 2\pi\right\},\ F(\alpha,W) = F(\alpha,\rho,u,v) = \frac{1}{4\pi}\frac{\mu\rho\sqrt{\left(\rho^2+u^2\right)\sin^2\varphi + v^2}}{\sqrt{R^2+\rho^2-2R\rho\cos\psi}}, \tag{13}$$

$$\cos\psi = \cos\varphi\cos\varphi_0 + \sin\varphi\sin\varphi_0\cos(\lambda-\lambda_0),$$

получаем следующее уравнение фигуры Земли

$$\int_{\partial G} K_n(\alpha,\beta)m_n(\tilde\beta)d\tilde\beta = V(\alpha) - \frac{1}{4\pi}\int_{\partial G} F(\alpha,W_n)d\tilde\beta, \tag{14}$$

где $K_n(\alpha,\beta) = \dfrac{1}{4\pi}\left\{\dfrac{\partial F(\alpha,W_n)}{\partial\rho} - \dfrac{\partial^2 F(\alpha,W_n)}{\partial\varphi\partial u} - \dfrac{\partial^2 F(\alpha,W_n)}{\partial\lambda\partial v}\right\}$.

4. Сходимость метода. Доказана сходимость последовательных приближений (14) фигуры Земли, представив его в виде последовательного итерационного уточнения:

$$\int_{\partial G} K_n(\alpha,\beta)m_n(\tilde\beta)d\tilde\beta = \int_{\partial G} K_{n-1}(\alpha,\beta)m_{n-1}(\tilde\beta)d\tilde\beta - \frac{1}{4\pi}\int_{\partial G}\left[F(\alpha,W_n) - F(\alpha,W_{n-1})\right]d\tilde\beta. \tag{15}$$

Обозначив экстремумы ядра $K_n(\alpha,\beta)$ как $\min\limits_{\alpha}\left|\int_{\partial G} K_n(\alpha,\beta)d\tilde\beta\right| \ge K_-$ и $\max\limits_{\alpha}\left|\int_{\partial G} K_n'(\alpha,\beta)d\tilde\beta\right| \le K_+$,

будем иметь для оценки искомой разности цепочку неравенств:

$$\left\|\rho_{n+1}(\tilde\beta) - \rho_n(\tilde\beta)\right\|_{B_1} \le \left(\frac{K_+}{K_-}\right)^{2^2}\left\|\rho_{n-2}(\tilde\beta) - \rho_{n-3}(\tilde\beta)\right\|_{B_1}^{2^3} \le \ldots \le \left(\frac{K_+}{K_-}\right)^{2n-1}\left\|\rho_1(\tilde\beta) - \rho_0(\tilde\beta)\right\|_{B_1}^{2^n}, \tag{16}$$

откуда и получаем в силу условий (12), (13) для выпуклой поверхности ∂G доказательство сходимости уравнения (14).

Выводы. Исходя из линейного интегрального уравнения силы тяжести (4), представленного в виде нелинейного уравнения для восстановления плотности, получены аналитические аппроксимации для описания аномалий высот геоида (9)-(10) и для уточнения фигуры Земли – в виде линейного интегрального уравнения 1-го рода (14). Для последнего указан итерационный способ нахождения последовательных приближений (15) и доказана его сходимость (18). Последнее обстоятельство при исходных предположениях о гладкости границы области ∂G и ограниченности ядра $K_n(\alpha,\beta)$ следует считать и доказательством существования решения в численном виде, исходя из предложения Маслова [5].

Ради обеспечения численной устойчивости алгоритма (14) следует избрать для его дискретизации и вычислений подход, изложенный в [6] для численного решения интегральных уравнений 1-го рода, в частности, заменив интегральное ядро $K_n(\alpha,\beta)$ интегральной суммой по методу трапеций при разбиении интервала интегрирования равномерной сетью точек.

Литература

1. *Reigber C., Schmidt R., Fletcher F., König R., Meyer U., Neumayer K.H., Schwintzer P., Zhu S.Y.* An Earth gravity field model complete to degree and order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S // Journal of Geodynamics. – 2005b. – V. 39. – P. 1–10.
2. *Степанова И.Э.* Вычисление уклонений отвесной линии и превышений геоида в некоторых районах Атлантики с применением метода линейных интегральных представлений // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравиметрических, магнитных и электрических полей, Ухта, 29.01-3.02.2008 г.: Мат. 35-й сессии Межд. семинара им. Д.Г. Успенского. – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 293–294.
3. *Дубовенко Ю.И.* Об уточнении аномалий геоида // Геофиз. журнал. – 2008. – 30, № 4. – С. 112–122.
4. *Кабан М.К., Гайгбер К.* Новые возможности гравитационного моделирования с использованием данных спутников CHAMP и GRACE // Физика Земли. – 2005, № 11. – С. 101–109.
5. *Маслов В.П.* Регуляризация некорректных задач для сингулярных интегральных уравнений // ДАН СССР. – 1967. – 176, №5. – С. 1012–1014.
6. *Верлань А.Ф., Сизиков В.С.* Интегральные уравнения: методы, алгоритмы программы. Справ. пособ. – К.: Наук. думка, 1986. – 544 с.

УДК 552.1:53

ЛАБОРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД

А.Д. Дучков[1], М.Е. Пермяков[1], Л.С. Соколова[1], А.Ю. Манаков[2]

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука (ИНГГ) СО РАН, 630090, г. Новосибирск, Россия, DuchkovAD@ipgg.sbras.ru.

[2]Институт неорганической химии им. А.В. Николаева (ИНХ) СО РАН, 630090, г. Новосибирск, Россия, manakov@niic.nsc.ru

Описаны лабораторные установки, позволяющие моделировать гидратосодержащие искусственные образцы и исследовать их физические свойства (теплопроводность, удельное электрическое сопротивление и скорости акустических волн). Наиболее подробно представлена аппаратура по измерению акустических свойств. Рассмотрены некоторые результаты экспериментов.

LABORATORY INSTALLATIONS FOR THE STUDY OF PHYSICAL PROPERTIES OF GAS HYDRATE-BEARING ROCKS

A.D. Duchkov[1], M.E. Permaykov[1], L.S. Sokolova[1], A.Yu. Manakov[2]

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS. 630090, Novosibirsk, Russia, DuchkovAD@ipgg.sbras.ru, PermyakovME@ipgg.sbras.ru

[2]Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia, manakov@niic.nsc.ru

Laboratory facilities that allow modeling artificial hydrate-bearing specimens and studying their physical properties (thermal conductivity, electrical resistivity and velocity of acoustic waves) are described. The equipment for the acoustic properties measurement is described particularly. Here some experimental results are presented.

В России только в последнее десятилетие геологическими методами (подводное бурение, пробоотбор грунтовыми трубками) выявлено более 50 скоплений гидратов метана в поддонных осадках оз. Байкал [1] и Охотского моря [2]. Несомненно, что в ближайшие годы будут обнаружены гидратные месторождения в арктических окраинных морях. Весьма вероятно, наличие реликтовых скоплений гидратов метана в криолитозоне Сибири [3]. В настоящее время, даже наиболее доступные для исследователей поддонные скопления гидратов, расположенные в самом верхнем слое осадков, изучены относительно слабо; отсутствуют геофизические методики поисков и оконтуривания тел газогидратов, что объясняется в том числе недостаточной изученностью физических свойств гидратосодержащих пород (ГСП). Обычно физические свойства ГСП изучаются в лабораторных условиях на искусственных образцах, что требует создания достаточно сложных установок, содержащих камеры высокого давления с регулируемыми параметрами. Эта работа активно проводится в США, Японии и ряде других стран [4, 5], но только начинается в России. Группа научных сотрудников из ИНГГ и ИНХ СО РАН приступила к изготовлению необходимой аппаратуры в 2004 г.

Теплопроводность. Наиболее интересными характеристиками ГСП являются их тепловые параметры, определяющие динамику температурного поля, контролирующего процессы формирования и распада газовых гидратов. Поэтому первоначально была разработана и изготовлена установка, позволяющая моделировать образцы пород, содержащих метангидраты, и измерять их теплопроводность (рис. 1) [6]. Для измерения теплопроводности среды, заполняющей камеру, использовался игольчатый зонд постоянной мощности. Температура (Т) в камере измерялась с точностью до $0{,}005^0$С, давление (Р) – с точностью до 0,01 МПа. Для получения ГСП в рабочую камеру установки загружалась смесь кварцевого песка и молотого льда. Затем камера закрывалась, и минеральная смесь

заполнялась метаном под давлением 4-7 МПа. В течение 4-5 часов в образце происходило формирование метангидрата. Применялись и другие методики моделирования ГСП. Всего было выполнено несколько десятков экспериментов по моделированию гидратосодержащих образцов и измерению их теплопроводности.

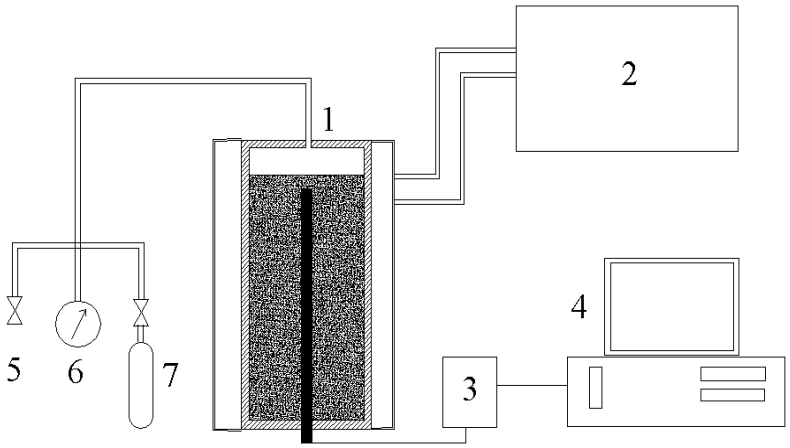


Рис. 1. Схема установки для моделирования образцов пород, содержащих газовые гидраты, и измерения их теплопроводности: 1 - цилиндрическая камера высокого давления (диаметр рабочего пространства – 40 мм, высота – 155 мм, давление до 40 МПа), 2 – термостат, 3 – устройство для измерения теплопроводности и температуры в камере (игольчатый зонд и регистрирующая система), 4 – компьютер, 5 – выпускной вентиль, 6 – манометр, 7 – баллон с метаном.

Анализ полученных данных показал, что зафиксированное различие значений теплопроводности, записанных при разном состоянии газогидратов (стабильное и нестабильное), позволяет однозначно судить о наличии или отсутствии в образце (или поддонных осадках) газогидратов и примерно оценить массу газогидрата в среде. Выполненные эксперименты позволили сформулировать основные принципы геотермического метода поисков гидратосодержащих осадков посредством измерения их теплопроводности in situ цилиндрическими зондами разной мощности [7].

Электросопротивление. В зарубежных странах основное внимание уделяется изучению электрических и акустических свойств ГСП, т.к. именно электромагнитные и сейсмические методы в основном применяются при поисках и разведке скоплений газовых гидратов в морских осадках [4,5].

Для измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) гидратосодержащих образцов была изготовлена отдельная установка (рис. 2), основным блоком которой также является стальная цилиндрическая камера высокого давления (внутренний диаметр камеры – 100 мм, длина - 250 мм, давление – до 10 МПа) [8]. С целью создания стабильных температурных условий камера окружена стальной тонкостенной полостью (конструктивно исполнена как единое целое с камерой), по которой в процессе эксперимента циркулирует силиконовая жидкость с высоким электросопротивлением (полиметилсилоксан). Для измерения УЭС образца мы применили четырехэлектродный зонд AMNB, собранный на пластиковой трубке (диаметр 3 мм) и размещенный в центре камеры (образца). Длина зонда - 140 мм, диаметр измерительной части – 4 мм, длина латунных электродов – 3 мм. При указанных размерах зонда электрический сигнал проникает в образец на расстояние (радиус) 20-30 мм. Измерения УЭС производились методом сопротивлений по схеме, приведенной на рис. 2. Во время измерений через образец пропускается синусоидальный электрический сигнал с напряжением 1 В (для предотвращения электролиза) и заданной частотой (в основном использовалась частота 600-1000 Гц) от низкочастотного генератора сигналов. Падение напряжения измеряется на электродах MN и на эталонном сопротивлении R.

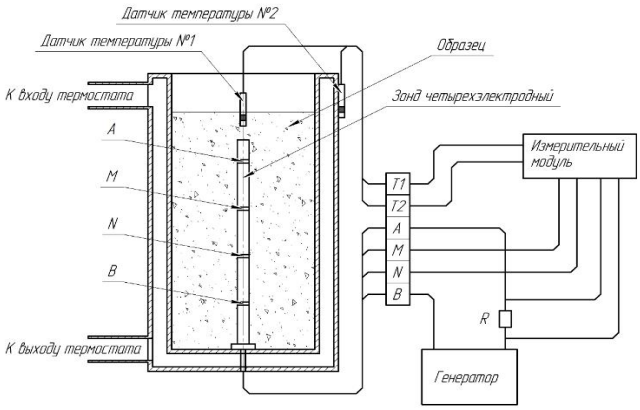


Рис. 2. Схема измерительной системы установки для измерения УЭС гидратосодержащих образцов: ГЗ-109 - генератор электрических сигналов, R = 100,3 Ом – эталонный резистор; измерительный модуль - позволяет в реальном времени измерять разности потенциалов, вычислять УЭС (до 100 кОм) и записывать эти данные на компьютер с частотой несколько отсчётов в минуту.

При формировании гидратосодержащих образцов в данном случае использовался кварцевый песок и тетрагидрофуран (C_4H_8O) в качестве гидратообразователя. Тетрагидрофуран (ТГФ) является прозрачной, бесцветной жидкостью, хорошо смешивающейся с водой. Раствор 19.4 масс. % ТГФ в воде формирует в образце гидраты при атмосферном давлении и T=3-4^{0}C. Многочисленными исследованиями показано, что гидрат тетрагидрофурана можно использовать в качестве удобной экспериментальной модели гидрата метана при изучении физических свойств ГСП [5].

На описанной установке проведено несколько десятков экспериментов по моделированию мерзлых и гидратосодержащих образцов и измерению их УЭС. Показано, что основными факторами, определяющими УЭС этих образцов, является их минеральный состав, структура и агрегатное состояние флюида, заполняющего поровое пространство. Эксперименты продолжаются с целью наработки массива информации необходимого для установления зависимостей УЭС различных по составу пород от гидратонасыщенности (льдистости).

Скорости акустических волн. Для измерения скоростей распространения в ГСП акустических волн построена лабораторная установка, представленная на рис. 3.

Рис. 3. Общий вид установки для моделирования гидратосодержащих образцов и измерения их акустических свойств: *1* - генератор импульсов АКИП-3305, *2* - компьютер, *3* - цифровой осциллограф АКИП-72208А, *4* - камера высокого давления с термостатирующей рубашкой, *5* - блок стрелочных манометров, *6* – насосная установка, *7* – термостат Huber Ministat, *8* - гидроцилиндр, *9* - порты для подачи газа/жидкости к образцу, *10* - вентили осевого и бокового давления.

Основным узлом установки является камера высокого давления, в которой размещается исследуемый образец. Размеры камеры позволяют работать с образцами диаметром 30 мм и высотой 10-50 мм. Установка включает также блоки создания внешнего (осевого и бокового) давления на образец (насосная установка, переключатель потока,

вентили, манометры), доставки газа/жидкости в образец, термостатирования и измерительную систему, предназначенную для возбуждения и приема акустических волн. Камера состоит из стального цилиндра с внутренней резиновой манжетой и двух пуансонов с акустическими датчиками. Она рассчитана на максимальное давление 45 МПа. Источником давления в магистрали служит насосная установка. Для охлаждения камеры до температуры, необходимой для образования в образце гидратов или льда, используется термостат. Измерительная система установки состоит из генератора высоковольтных импульсов, цифрового осциллографа, излучателя и приемника ультразвуковых импульсов. Последние имеют одинаковую конструкцию и вмонтированы в верхний и нижний пуансоны. Датчики продольных (P) волн сделаны из дисков пьезокерамики ЦТС-9 диаметром 18 мм и толщиной 2 мм, поляризованной по толщине диска, датчики поперечных (S) волн - из дисков, поляризованных по диаметру.

Основными измеряемыми акустическими параметрами являются скорости P и S волн. Источник ультразвуковых волн генерирует в излучателе прямоугольный импульс длительностью 1мкс и амплитудой 150 В, который после прохождения образца фиксируется приемником и поступает на один из каналов цифрового осциллографа. Одновременно генератор вырабатывает синхроимпульс, который подается на другой канал и служит точкой отсчета при измерениях времени прихода волны. Такая методика позволяет избежать ошибок, связанных с возможной нестабильностью синхронизации осциллографа. Частота дискретизации сигнала 250 МГц, т.е. шаг записи равен 4 нсек. Скорости P- и S-волн рассчитываются по формуле: $V= L/(t_u - t_з)$, где L- длина образца, t_u – время прихода ультразвукового импульса в приемник, $t_з$ – время задержки импульса в акустическом тракте «источник - приемник». Для нашей установки $t_з^P$ =5.04 мкс для P-волны и $t_з^S$ =8.68 мкс для S-волны.

Для проверки работоспособности установки выполнены тестовые измерения скоростей прохождения акустических волн через консолидированные образцы (оргстекло и кварцевый песчаник) и образцы кварцевого песка (сухого, влажного, замороженного и содержащего гидраты). Первым объектом измерений был эталонный образец из оргстекла. Измерения проводились при внешнем давлении 5 МПа и комнатной температуре. Получены значения скоростей Vp=2704 м/с, Vs=1373 м/с, которые практически совпадали со справочными данными (Vp = 2724 м/с и Vs = 1365 м/с). Более высокие значения скоростей получены при тестовых измерениях образца сцементированного мелкозернистого песчаника, отобранного с глубины 2700 м из пласта одного из нефтяных месторождений Западной Сибири. В данном случае измерения акустических скоростей проводились при комнатной температуре и внешнем давлении 5, 10 и 15 МПа. Зафиксирован заметный (в пределах 10%) рост скоростей Vp (от 4133 до 4511 м/с) и Vs (от 2607 до 2941 м/с) при увеличении давления от 5 до 15 МПа. При давлении 15 МПа значения скоростей оказались практически идентичными (различие не более 1%) полученным ранее на другой установке. С наихудшими условиями для возбуждения акустического сигнала пришлось столкнуться в процессе измерений образцов сухого кварцевого песка при температуре 15^0C и давлении 5, 10, 15 МПа. Удалось отчетливо зафиксировать влияние внешнего давления на форму импульса и скорости распространения P и S волн в сухом песке. Скорость P-волны заметно изменяется (от 1069 до 1410 м/с) при увеличении давления от 5 до 15 МПа. Скорость S-волны стабилизируется на уровне 799-868 м/с при давлении более 10 МПа. Эксперименты с сухим песком позволили определить минимальное давление (10-15 МПа) обжатия, которое обеспечивает необходимое сцепление датчиков с неконсолидированными образцами. Мокрый песок измерялся при температурах 15^0C и -7^0C и при давлениях 5, 10 и 15 МПа. При положительных температурах насыщение песка водой не сказывалось заметно на скорости прохождения акустического сигнала. При замерзании воды скорости акустических волн резко увеличивались (примерно до уровня скоростей в образце консолидированного песчаника) и практически не изменялись с ростом давления. На записях хорошо заметно увеличение амплитуды сигнала при замерзании песка, что свидетельствует о повышении

добротности образца. На записях Р-волны также фиксировался длинный цуг реверберационных помех (переотражения, резонансы и т.д. от всех границ как внутри датчиков, так и внутри установки). Проведены эксперименты по формированию в камере установки образцов, содержащих гидраты метана. Зафиксированы изменения скоростей акустических волн, связанные с образованием и диссоциацией гидратов. При образовании в песке газогидрата наблюдалось резкое увеличение скоростей акустических волн и повышение добротности образцов (примерно до уровня песчаника).

В результате выполненных исследований сконструированы, изготовлены и неоднократно протестированы три установки, позволяющих моделировать образцы, содержащие гидраты (газовые или тетрагидрофурана), и измерять их теплопроводность, удельное электрическое сопротивление и скорости акустических волн. Многочисленные эксперименты показали, что разработанные устройства позволяют измерять физические свойства ГСП в процессе формирования/разложения гидратов, а также свойства мёрзлых пород на разных стадиях их замерзания/оттаивания.

Благодарности: Исследования тепловых и электрических свойств гидратосодержащих осадков проводились при поддержке грантов РФФИ №№ 05-05-64122-а, 08-05-00804-а, 12-05-00415-а, 12-05-31370 (мол.). Изготовление установки для изучения акустических свойств выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00511) в ИНГГ и ИНХ СО РАН. Авторы благодарят Дучкова А.А., Голикова Н.А., Дробчика А.Н. за предоставленные материалы.

Список литературы

1. Хлыстов, О. М. Новые находки газовых гидратов в донных осадках озера Байкал // Геология и геофизика. 2006. Том 47. № 8. С. 979-981.
2. Обжиров А.И., Коровицкая Е.В., Пестрикова Н.Л., Телегин Ю.А. Нефтегазоносность и газогидраты в охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2012, № 2 (14). С. 55-62.
3. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.
4. Waite W.F., Santamarina J.C., Cortes D.D., Dugan B., Espinoza D.N., Germaine J., Jang J., Jung J.W., Kneafsey T.J., Shin H., Soga K., Winter W.J., Yun T.-S. Physical properties of hydrate-bearing sediments // Reviews of Geophysics, 2009, 47, RG4003, p. 1-38.
5. Riedel M., Willoughby E. C., Chopra S. (Eds.). Geophysical characterization of gas hydrates (SEG geophysical developments series; no. 14). Tulsa: Society of exploration geophysicists. 2010. 390 p.
6. Дучков А.Д., Манаков А.Ю., Казанцев С.А., Пермяков М.Е., Огиенко А.Г. Экспериментальное моделирование и измерение теплопроводности пород, содержащих гидраты метана // Докл. РАН, 2006. Т. 408. №5. С. 656-659.
7. Дучков А.Д., Истомин В.Е., Соколова Л.С. Геотермический метод обнаружения газовых гидратов в поддонных осадках // Геология и геофизика, 2012. Том 53. №7. С. 922-931
8. Пермяков М.Е., Манченко Н.А., Ильдяков А.В. Измерение электропроводности гидратосодержащих образцов // Трофимуковские чтения – 2013: Материалы всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых. Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2013. – С. 305-308.

УДК 550.362, 550.836

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НЕКОНСОЛИДИРОВАННЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ ВБЛИЗИ АРХИПЕЛАГОВ ШПИЦБЕРГЕН И ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА

А.В. Ермаков*, a.v.ermakov@gmail.com*
Геологический институт РАН, Москва, Россия.

Рассматриваются особенности распределения теплопроводности морских осадков в северной части шельфа Баренцева моря и прилегающих акваториях Гренландского моря и Северного Ледовитого океана. Исследование выполнено на материале, полученном автором, с привлечением литературных данных. Установлено, что для шельфа и верхней части континентального склона а также для океанических хребтов характерны более высокие значения теплопроводности, чем для смежных понижений рельефа. Выявленные отличия связаны в первую очередь с различным минералогическим и фракционным составом осадков, формирование которого для возвышенных участков определяется литологией коренных пород. Известная в литературе зависимость теплопроводности от влажности, предложенная Буллардом, в рассматриваемом регионе начинает проявляться лишь у подножия континентального склона и в глубоководных котловинах.

SPATIAL CHANGES IN THERMAL CONDUCTIVITIES OF UNCONSOLIDATED BOTTOM SEDIMENTS IN THE VICINITY OF SPITSBERGEN AND FRANZ JOSEF LAND ARCHIPELAGOES

A.V. Ermakov*, a.v.ermakov@gmail.com*
Geological Institute RAS, Moscow, Russia.

Study concerns some peculiarities of the thermal conductivity distribution of marine sediments in the northern part of the Barents Sea shelf and adjacent areas of the Greenland Sea and the Arctic Ocean. The study was performed on material obtained by the author, and on a previously published data. It was found that the sediments of the shelf and upper continental slope and also oceanic ridges have higher thermal conductivity than the adjacent depressions. That difference is due primarily to the different mineralogical and fractional composition, the formation of which is depepends on the bedrock lithology of the elevated areas. Dependence of thermal conductivity on wet water content invented by Bullard in this region seems to be appeared only at the foot of the continental slope and in the deep basins.

Имеющиеся данные по теплопроводности осадков северной части Баренцева моря, юго-западной части котловины Нансена и осадков восточной части Норвежско-Гренландского бассейна можно разделить на две группы: измерения in situ зондами для измерения плотности теплового потока, и измерения ex situ в условиях судовой или наземной лаборатории по керну грунтовых колонок. Большинство из этих определений выполнялись для последующего расчета зачений теплового потока.

Анализ опубликованных данных показал, что количество средних значений теплопроводности существенно меньше числа станций измерения теплового потока (ТП) в регионе. Возросшее количество измерений in situ в последние десятилетия связано с изменением элементной базы для изготовления зондов ТП. В более ранних работах, теплопроводность определялась по керну грунтовой трубки, иногда совмещенной с автономными регистраторами температуры. Полученные в лаборатории значения теплопроводности при определении величины ТП приписывались ближайшим станциям в пределах профиля, или даже всем станциям на профиле (см., например, [1]). Для большинства опубликованных работ, метод определения величины теплопроводности, там где он указан авторами,– это метод бесконечного линейного источника тепла или цилиндрического зонда (вероятно, и для остальных работ так же).

Помимо прямого определения теплопроводности в геотермических исследованиях на акваториях часто используется косвенный метод, основанный на существовании эмпирических зависимостей теплопроводности от влажности осадков. Еще Буллард [2] писал: «кажется, что теплопроводность океанских донных осадков зависит больше от влажности, чем от минералогического состава». Впервые эмпирическая кривая зависимости теплопроводности от влажности морских осадков представлена в [3] на материале из Атлантического, Тихого океанов и Средиземного моря.

В [4] предложена кривая с несколько более высокими значениями теплопроводности при аналогичных значениях влажности. В [5] по результатам определения теплопроводности и влажности осадков в Канадской котловине и на поднятии Альфа приводится кривая той же формы, что и предыдущие, но с еще более высокими значениями теплопроводности, что связывается авторами с повышенным содержанием доломита в осадках. Все опробованные осадки четко делятся на две группы, соответствующие глубинам станций опробования: влажность осадков на поднятии ниже, а теплопроводность выше, чем в котловине.

Осадки вблизи архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) в теплофизическом отношении исследованы, в относительно небольшом числе пунктов, порядка 170 (рис. 1).

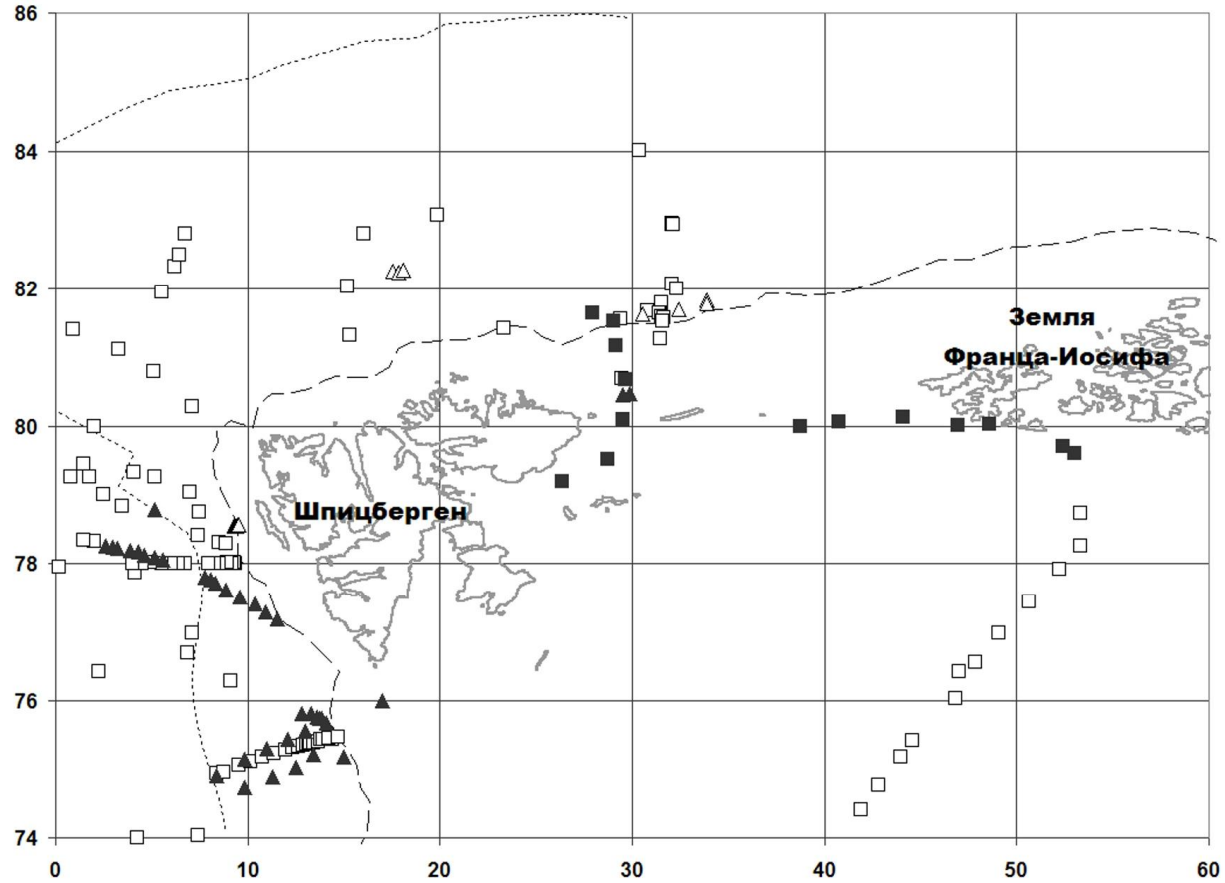


Рис. 1. Станции определения теплопроводности в районе исследований. Точечной линией нанесены оси спрединговых хребтов, штриховой – изобата -500 м. Значения теплопроводности, полученные in situ показаны треугольниками; определенные по кернам грунтовых трубок – квадратами. Фигуры с заливкой – определения, выполненные автором в 25-27 рейсах НИС «Академик Николай Страхов». Фигуры без заливки приведены по литературным данным [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

По профилю п-ов Рыбачий – ЗФИ теплопроводность донных осадков исследована в 23 рейсе (1976) НИС «Академик Курчатов» на 28 станциях до глубины 4 м [8]. В среднем по

профилю теплопроводность колеблется от 1,04 до 1,55 Вт/м·К. Отмечается неравномерное распределение, с выделением «ядер» повышенных и пониженных значений, причем последние приурочены к возвышенным участкам рельефа. На Северо-Восточном плато теплопроводность меняется от 0,92 до 1,46 Вт/м·К. На отдельных станциях теплопроводность максимальна в первом метре осадков. Авторы отмечают, также, что средняя теплопроводность по профилю выше той же величины для глубоководных осадков.

Крэйн с соавторами [10] приводят средние значения для северо-восточного шельфа Шпицбергена от 0,96 до 1,13 Вт/м·К (частные значения от 0,8 до 1,8 Вт/м·К). Средние значения для плато Ермак составляют от 0,99 до 1,16 Вт/м·К (частные значения от 0,8 до 1,4 Вт/м·К). Для осадков рифтовой долины и флангов хребта Книповича средние значения от 0,89 до 1,0 Вт/м·К (частные значения от 0,8 до 1,3 Вт/м·К). По большинству станций отмечается увеличение теплопроводности с глубиной.

По двум профилям на западном склоне Шпицбергена [1] очевидна тенденция к снижению средней теплопроводности с увеличением глубины от 1,4-1,6 Вт/м·К на крае шельфа и верхней часть континентального склона до 1-1,1 Вт/м·К у его подножия. Осадки на хребте Книповича по этим профилям имеют теплопроводность 1,24-1,28 Вт/м·К. Для южного профиля, пересекающего конус выноса Стурфьорда, график снижения теплопроводности имеет более плавный вид, чем для северного, на траверзе Ис-фьорда. В разрезе наблюдается увеличение теплопроводности от 0,8-0,9 до 1,8-1,9 Вт/м·К.

Для западной части шельфа с глубинами 360-500 м на траверзе Земли Принца Карла характерны высокие значения теплопроводности: от 1,5-1,6 до 2,2-2,4 Вт/м·К [13]; возрастание значений также происходит в сторону суши.

В ходе рейсовых работ 25-27 рейсах НИС «Академик Николай Страхов» [14, 15, 16] были получены новые значения теплопроводности донных осадков на шельфе и континентальном склоне. Часть значений была получена in situ (132 частных значения по 39 станциям), часть – ex situ по грунтовым колонкам в судовой лаборатории (91 частное значение по 14 станциям). Значения in situ получены для западного склона Шпицбергена (большая часть) и северо-восточного шельфа Шпицбергена. Значения по грунтовым колонкам получены для шельфа между Шпицбергеном и ЗФИ. Полученные ex situ значения теплопроводности варьируют от 0,68 до 2.31 Вт/м·К. Значения in situ имеют меньший разброс, тяготея к 0.9 – 1,1 Вт/м·К.

При анализе наблюдений in situ рассчитывалось среднее значение теплопроводности, по четырем расчетным базам геотермического зонда. Для измерений в западной части региона расположенных вдоль профилей, ориентированных в субширотном направлении наблюдается снижение теплопроводности от континентального склона, начиная с глубин около 1000 м к рифтовой долине спредингового хребта Книповича. В пределах самой рифтовой долины и ее бортов теплопроводность увеличивается почти до «шельфовых» значений. Повышенные значения характерны также и для хребта Ховгард.

Сравнение распределения теплопроводности литологического состава отложений и некоторых других их характеристик [17], позволили сделать следующие наблюдения. Изменения теплопроводности в пределах колонки в большом числе случаев фиксируют изменения в составе осадков (границы между горизонтами). Сопоставление влажности и теплопроводности не во всех случаях дает характерную обратную зависимость; если влажность с глубиной убывает для всех колонок, то теплопроводность для некоторых не увеличивается, а уменьшается с глубиной. Зависимость теплопроводности от влажности здесь в явном виде не наблюдается. Этот вывод подтверждается анализом данных [18]; которые показывают хорошее соответствие кривой лишь для глубоких станций, но не для станций верхней части континентального склона и бровки шельфа.

Описанное выше распределений средних значений теплопроводности может быть связано с различиями в гранулометрическом и минеральном составе осадков. Так, исследования [18] показывают постепенное уменьшение содержания песчаной и илистой фракций с глубиной, причем для западного склона Шпицбергена и плато Ермак это

уменьшение имеет более постепенный характер, чем для котловины Нансена к северу от шельфа между Шпицбергеном и ЗФИ, и преобладание крупных фракций сохраняется до больших глубин.

Увеличение карбонатности осадков существенно увеличивает их теплопроводность. Под влиянием Атлантических вод с повышенной биопродуктивностью, омывающих шельф Шпицбергена в проливе Фрама, котловине Нансена и заходящих в желоба шельфа между Шпицбергеном и ЗФИ, а также из-за вклада разрушающихся карбонат-содержащих пород формации Гекла-Хук в осадках этих районов повышено содержание карбонатов от 1-2 % до 30 % и более [17, 19, 20]. Содержание карбоната 10-20% характерно для плато Ермак, хребта Гаккеля; на северном шельфе Шпицбергена было получено единичное значение 38% $CaCO_3$. Минимальные значения, меньше 5% получены в центральных частях котловин Нансена и Амундсена и к северу от Шпицбергена [21].

Для северной части шельфа Баренцева моря и прилегающей к архипелагам части континентального склона характерно довольно большое содержание в глинистой части осадка хлорита и каолинита [21], имеющих более высокую теплопроводность, чем другие глинистые минералы. Обычно в составе глинистой части осадка преобладает иллит, содержание которого составляет от 40 до 70%; наибольшие значения получены к северу от Шпицбергена, наименьшие – на шельфе Баренцева моря и в котловине Нансена севернее ЗФИ. Содержание хлорита колеблется около 22%, не выходя за пределы 20-25%. Содержание каолинита составляет от 10 до 40, превышая значение в 20% к северу от Шпицбергена и ЗФИ и достигая максимума на шельфе между этими архипелагами. Смектит распространен менее других глинистых минералов, содержание на шельфе Шпицбергена составляет менее 5%, увеличиваясь в сторону хребта Ломоносова. Источником иллита является преимущественно Шпицберген, каолинита – ЗФИ [21].

Таким образом, для неконсолидированных донных осадков вблизи архипелагов Шпицберген и ЗФИ характерны более высокие значения теплопроводности, в сравнении со смежными акваториями а распределение значений по глубине и в пространстве имеет сложный характер, связанный с совместным влиянием нескольких факторов, главными из которых являются изменения гранулометрического состава, карбонатности осадков и преобладания в глинистой части осадков хлорита и каолинита. Зависимость теплопроводности от влажности проявляется в рассматриваемом районе только при больших глубинах моря, где в составе осадка преобладает глинистая фракция.

Список использованной литературы

1. Crane K., Sundvor E., Foucher, J.P., Hobart M.A., Myhre A.M., LeDouaran S. Thermal evolution of the western Svalbard margin // Marine Geophysical Research. 1988. № 9(2). Pp. 165-194.
2. Bullard, E. C, The flow of heat through the floor of the Atlantic Ocean // Proc. Royal Soc. London A, 222, 408-429, 1954.
3. Ratcliffe, E. B., The thermal conductivities of ocean sediments, Journal of geophysical research. 1960. V. 65(5). Pp. 1535- 1541.
4. Bullard, E. C., and A. Day, The flow of heat through the floor of the Atlantic Ocean // Geophys. J., 4 (spec. vol.), 282-292, 1961.
5. Lachenbruch A., Marshall V. Heat flow through the Arctic Ocean floor: the Canada Basin-Alpha Rise Boundary // Journal of Geophysical Research. 1966. V. 71. Issue 4. P. 1223-1248.
6. Langseth M., Zielinski G. Marine Heat Flow Measurements in the Norwegian-Greenland Sea and in the Vicinity of Iceland // Geodynamics of Iceland and the North Atlantic Area. 1974. Pp. 277-295.
7. Цыбуля Л. А., Левашкевич В.Г. Тепловое поле Баренцевоморского региона. Апатиты: изд. КНЦ РАН, 1976. 115 с.

8. Меркушов В.Н., Подгорных Л.В., Смирнов Я.Б., Троцюк В.Я. Северный ледовитый океан, в кн.: Методические и экспериментальные основы геотермии. М.: Наука, 1983. 232 с.
9. Jackson H.R., Johnson G.L., Sundvor E., Myhre A.M. The Yermak Plateau: Formed at a triple junction // Journal of Geophysical Research. 1984. № 89(B5). Pp. 3223–3232.
10. Crane K., Eldholm O., Myhre A.H., Sundvor E. Thermal implications for the evolution of the spitsbergen transform fault // Tectonophysics. 1982. V. 89. Issues 1–3. P. 1–32.
11. Sundvor E. Heat Flow Measurements on the Western Svalbard Margin. University of Bergen, Seismological Observatory. Internal Report. 1986.
12. Crane K., Sundvor E., Buck R., Martinez F. Rifting in the northern Norwegian-Greenland Sea: Thermal tests of asymmetric spreading // Journal of Geophysical Research-Solid Earth. 1991. № 96(B9). Pp. 14529-14550
13. Berndt, C., Feseker, T., Treude, T., Krastel, S., Liebetrau, V., Niemann, H., Bertics, V.J., Dumke, I., Dunnbier, K.,Ferre, B., Graves, C., Gross, F., Hissmann, K., Huhnerbach, V., Krause, S., Lieser, K., Schauer, J. and Steinle, L. Temporal Constraints on Hydrate-Controlled Methane Seepage off Svalbard // Science. 2014. V. 343 (6168). P. 284-287.
14. Хуторской М.Д., Леонов Ю.Г., Ермаков А.В., Ахмедзянов В.Р. Аномальный тепловой поток и природа желобов в северной части Свальбардской плиты // Докл. РАН. 2009. Т. 424. № 2. С. 1-7.
15. Хуторской М.Д., Леонов Ю.Г., Подгорных Л.В., Ермаков А.В., Ахмедзянов В.Р. Геотермия Арктического бассейна – проблемы и решения // Строение и история развития литосферы. М.-С.-Пб. 2010. С. 570-598.
16. Ахмедзянов В. Р., Ермаков А. В., Хуторской М. Д. Новые данные о тепловом потоке Северной Атлантики // Докл. РАН. 2012. Т. 442. № 1. С. 112–117.
17. Научный отчет 25 рейса НИС «Академик Николай Страхов». М.: ГИН РАН, 2007. 145 с.
18. Spielhagen R., Pfirman S., Thiede J. Geowissenschaftlicher Bericht über die ARK-IV/3 Expedition des PFVS Polarstern im Sommer 1987 in das zentrale oestliche Arktische Becken. Berichte-Reports № 24. Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Kiel. 1988. 166 p.
19. Клёнова М.В. Геология Баренцева моря. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 366 с.
20. Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р. Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС. 2007. 404 с.
21. Stein R., Grobe H., Wahsner M. Organic carbon, carbonate, and clay mineral distributions in eastern central Arctic Ocean surface sediments // Marine Geology. 1994. V. 119. Pp. 269-285.

УДК 550.383

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОМ ФИЗИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В.А. Ерофеев, А.А. Протопопов, Л.Н. Дода, С.А. Шопин*, protopopov@tsu.tula.ru*
ФБГОУ ВО Тульский государственный университет, Тула, Россия

Предложена новая трехмерная модель геодинамо в которой источником конвекции является разница угловых скоростей твердого ядра Земли и мантии. Получены численные решения возбуждения конвективных течений и самовозбуждения геодинамо в приближении Буссинеска. Разработанная модель геодинамо может быть положена в основу подхода, позволяющего в последующем прейти к анализу воздействия возмущения геомагнитного поля Земли на конвективные течения геодинамо применительно к концепции сейсмотектогенеза.

ON A QUESTION OF A POSSIBLE PHYSICAL MECHANISM OF RELATION BETWEEN GEOMAGNETIC DISTURBANCES AND STRONG EARTHQUAKES

V.A. Erofeev, A.A. Protopopov, L.N. Doda, S.A. Shopin*, protopopov@tsu.tula.ru*
Tula State University, Tula, Russia

It is presented new 3D geodynamo model, in which convection source is the difference between angular velocities of solid Earth's core and mantle. Numerical solutions of excitation of convection currents and self-excitation of geodynamo in Boussinesq approximation are obtained. Developed geodynamo model could be considered as the basis, which allows to analyze geomagnetic disturbances influence on geodynamo convection currents in application to seismotectogenesis concept.

В работах [1-4] описаны эмпирическая схема краткросрочного прогноза землетрясений и космогеофизическая концепция сейсмотектогенеза, одним из основных элементов которых является свойство сейсмоэффективности геомагнитных возмущений, которое образно названо одним из авторов работ «геосейсмическим эхом солнечных бурь» [5] или эффектом D-триггера [1]. Свойство сейсмоэффективности заключается в том, что землетрясения происходят в среднем на 14 или 21-ые сутки после геоэффективных явлений на Солнце типа корональных выбросов массы или солнечных вспышек. Данное свойство позволяет по простой формуле рассчитывать потенциальные даты землетрясений [1]. Свойство установлено на основе анализа статического материала и носит эмпирический характер, лежащие в его основе физические процессы ясны в недостаточной степени, хотя в работе [1] и предложен один из возможных механизмов такой взаимосвязи.

В настоящей работе разрабатывается подход к исследованию взаимосвязи между геомагнитными возмущениями и сильными землетрясениями на основе модели геодинамо. Как известно, связь между электромагнитными и гидродинамическими явлениями усиливается по мере увеличения линейного масштаба явления. Для крупномасштабных явлений эта связь может быть очень сильной, например, в жидком ядре Земли [6, 7]. Поэтому можно предположить, что одно из возможных проявлений геофизического механизма эффекта D-тригера непосредственно связано с воздействием возмущенного геомагнитного поля на конвективные процессы геодинамо по аналогии с электротехническим эффектом реакции якоря. В данном случае особенный интерес представляет выявление условий, обеспечивающих интенсивное локальное выделение водорода, растворенного в расплаве жидкого ядра, на ее границе с мантией. Данный процесс с последующим перемещением (канального типа) эффективного теплоносителя – дегазируемого водорода через мантию способен принести избыточную тепловую энергию к месту подготовки Землетрясения, насытить ее водородом и сопутствующими газами, что, в конечном счете, может обусловить инициирование сильного события по триггерному механизму.

Для последующей проверки сделанного предположения первоочередной задачей является разработка основ подхода к анализу воздействия возмущения геомагнитного поля Земли на конвективные течения геодинамо.

Математическая трактовка теории вихревого движения в жидком ядре и возникновения в нем индукционных токов чрезвычайно затруднена и до сих пор не получила своего точного решения в общем виде, поэтому теория геодинамо, в основном, развивалась путем исследования кинематических моделей, в которых скорость движения расплава считается заданной, а определяется только магнитное поле [8, 9]. Для проведения анализа воздействия возмущения геомагнитного поля Земли на конвективные течения геодинамо такой подход не приемлем.

В современных трехмерных моделях геодинамо в качестве источников конвекции рассматриваются радиоактивные источники и осаждение тяжелой примеси, приводящей к росту твердого ядра. В соответствующих моделях сгенерированное магнитное поле начинает оказывать обратное влияние на течение посредством сил Лоренца [10]. Однако, в данных трехмерных моделях геодинамо вращение твердого ядра рассматривается вокруг вертикальной оси под действием сил вязкости со стороны жидкого ядра и магнитного поля, проникающего в твердое ядро [10]. Указанное допущение, принятое в трехмерных моделях геодинамо, находится в противоречии с экспериментально наблюдаемым фактом наличия у твердого ядра Земли угловой скорости, превышающей угловую скорость вращения мантии [11, 12].

В данной работе в качестве основного источника конвекции геодинамо рассматривается разность угловых скоростей при опережающем вращении внутреннего твердого ядра Земли по отношению к мантии в приближении Буссинеска. Рассматриваемое неравенство приводит к возникновению вихревых потоков в расплаве со сложной геометрией. Дополнительной силой, вызывающей движение расплава, является гравитационная сила. Потоки расплава при высокой температуре рассматриваются как носители теллурических токов, порождающих магнитное поле. Взаимодействие токов с магнитными потоками может проходить в режиме самовозбуждения – начальное магнитное поле возбуждает в движущемся расплаве электрические токи, которые усиливают магнитное поле, а оно, в свою очередь, усиливает токи. Этот процесс, очевидно, ограничен или возрастающими электродинамическими силами (Лоренца), или нелинейными свойствами расплава, например уменьшением электропроводности и магнитной проницаемости расплава в сильном магнитном поле.

Для решения задачи о течении расплава и возникновения процесса самовозбуждения магнитного поля необходимо рассмотреть взаимодействие между потоками расплава, распределением температуры и магнитной самоиндукцией в жидком ядре Земли. Так как рассматривается самоиндукция, то задача является нестационарной.

Задача сводится к решению системы уравнений тепломассопереноса, движения расплава (Навье-Стокса и неразрывности течения) и магнитного поля (Максвелла).

Фундаментальные уравнениями предлагаемой трехмерной модели геодинамо являются следующие уравнения.

Уравнение магнитного поля, вытекающее из уравнений Максвелла:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = rot\left[v \times B\right] + \frac{1}{\mu\sigma}\nabla^2 B \quad , \tag{1}$$

где B – магнитная индукция, μ – магнитная проницаемость, σ - электропроводность, v – скорость движения жидкости.

Уравнение движения единицы объема жидкости:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot grad\ v = -\frac{1}{\rho} gradP + \nu_0 \Delta^2 v + g - 2\left[\omega \times v\right] + \frac{1}{\mu\rho}\left[rotB \times B\right], \tag{2}$$

где ρ – плотность, P – давление, ω – угловая скорость вращения Земли, g- ускорение свободного падения, убывающее с глубиной.

Уравнение неразрывности:

$$div\,(v) = 0\,, \tag{3}$$

Уравнение теплопроводности:

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = div(\lambda\ gradT\ ) + c\rho\, v\ gradT\quad, \tag{4}$$

где с – теплоемкость вещества, λ – теплопроводность.

Для численного решения системы уравнений (1)-(4) использован метод конечных разностей в Декартовой системе координат, причем выбрана инерциальная система координат, в которой вокруг земной оси вращается только твердое ядро Земли с относительной по отношению в мантии угловой скоростью, а мантия – неподвижна. В такой системе координат в жидком ядре отсутствует сила Кориолиса. Компьютерная программа для численного решения уравнений модели разработана на языке Delphi.

В пространстве моделирования, выбранном, в первом приближении, в форме куба размерами, равными диаметру жидкого ядра $2R_M$, выделены сферические области твердого металлического ядра и окружающего его жидкого ядра, имеющими соответственно радиусы R_S и R_M. Алгоритм численного моделирования тепломассопереноса и самоиндукции магнитного поля Земли приведен на рис. 1.

Исходные данные: R_S, R_M, T_S, T_M, ω, λ, ρ, η, μ, σ, Δ	
Построение разностной сетки и определение принадлежности узлов сетки зонам Земли	
Начальное приближение: распределения энтальпии, температур, скоростей движения, магнитной индукции	
Цикл времени $t=t+dt$	
	Решение уравнения теплопроводности и определение распределения температуры $T(x,y,z)$
	Решение системы уравнений Навье-Стокса и неразрывности и определение распределения скоростей движения вещества $v_x(x,y,z)$, $v_y(x,y,z)$, $v_z(x,y,z)$
пока не стабилизируются значения температуры $\frac{\partial T}{\partial t} < \varepsilon$ и скоростей $\frac{\partial v}{\partial t} < \varepsilon$	
Итерационный цикл решения уравнения магнитной индукции (Максвелла)	
	Прямой обход узлов (B^+, 3.29)
	Обратный обход узлов (B, 3.29)
пока не стабилизируется значение индукции $B(x,y,z)$ магнитного поля	
Вывод результатов расчета $T(x,y,z)$, $v_x(x,y,z)$, $v_y(x,y,z)$, $v_z(x,y,z)$, $B(x,y,z)$	

Рис. 1. Алгоритм численного моделирования тепломассопереноса и самоиндукции магнитного поля Земли

В результате моделирования получено распределение температуры в жидком ядре близкое к сферическому, но с незначительным деформированием потоками расплава жидкого ядра: растянутое у экватора и сплющенное у полюсов, рис. 2. Течения расплава в жидком ядре в окрестности твердого ядра повторяют вращение последнего, рис. 3. Наличие сложноориентированных потоков расплава возбуждает магнитное поле, рис. 4.

Полученный результат, рис. 4, показывает, что магнитное поле в ядре Земли имеет ячеистое строение, т.е представляет собой чередующиеся южные и северные магнитные полюса. Наибольшее значение магнитная индукция достигает на границе жидкого ядра с твердым.

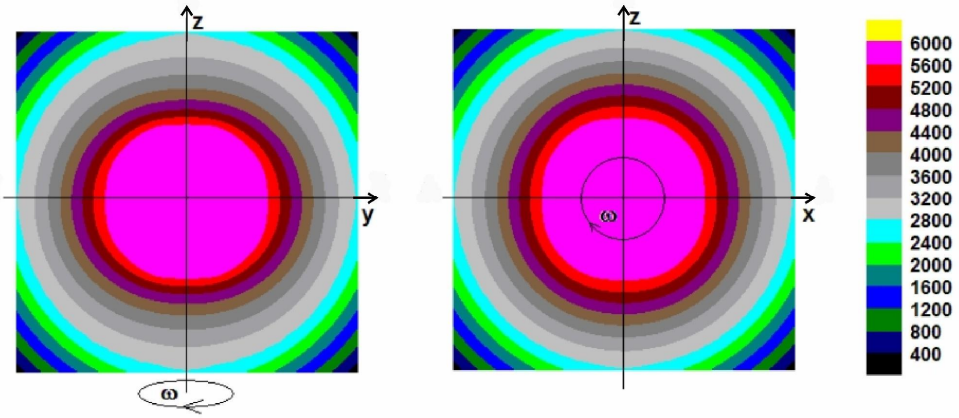


Рис. 2. Распределение температуры в жидком ядре, ^{o}K

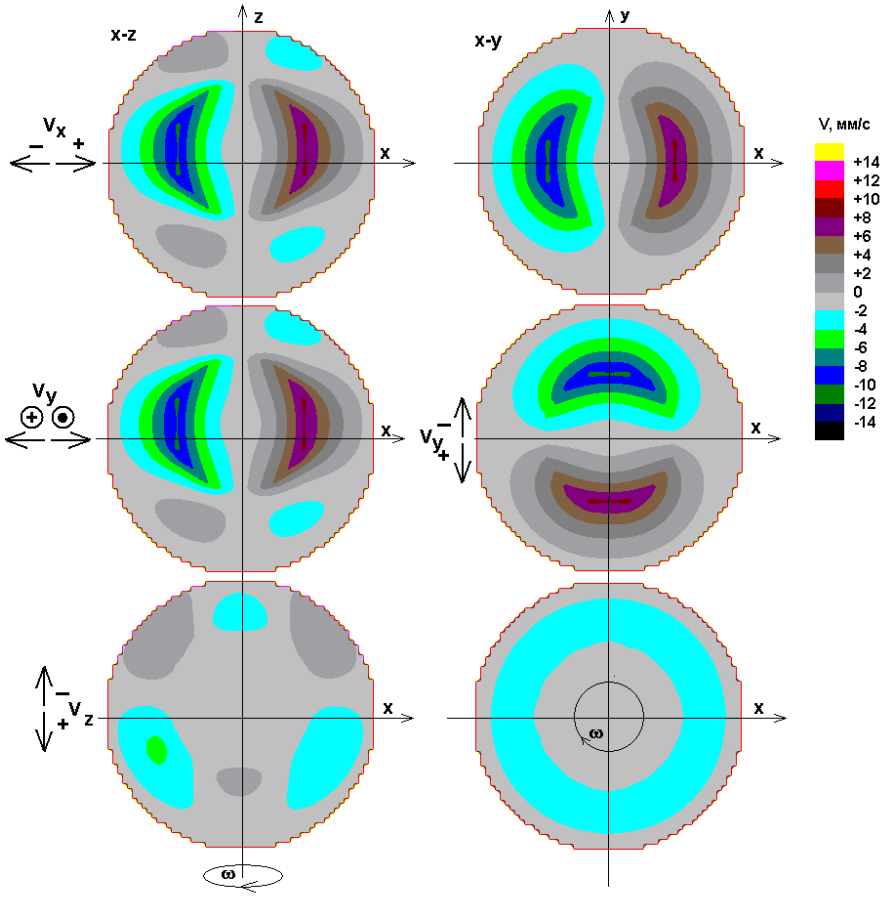


Рис. 3. Распределение координатных составляющих скорости движения в жидком ядре относительно мантии

Таким образом, предложена новая трехмерная модель геодинамо, в которой разница угловых скоростей вращения твердого ядра и мантии $\Delta\omega$ является достаточным условием для обеспечения возбуждения конвективных течений в жидком ядре и для самовозбуждения геодинамо, а изменение знака $\Delta\omega$ обусловливает инверсию магнитного поля. Данная модель может быть положена в основу подхода, позволяющего в последующем перейти к анализу воздействия возмущения геомагнитного поля Земли на конвективные течения геодинамо применительно к концепции сейсмотектогенеза.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, УИ RFMEFI57714X0109.

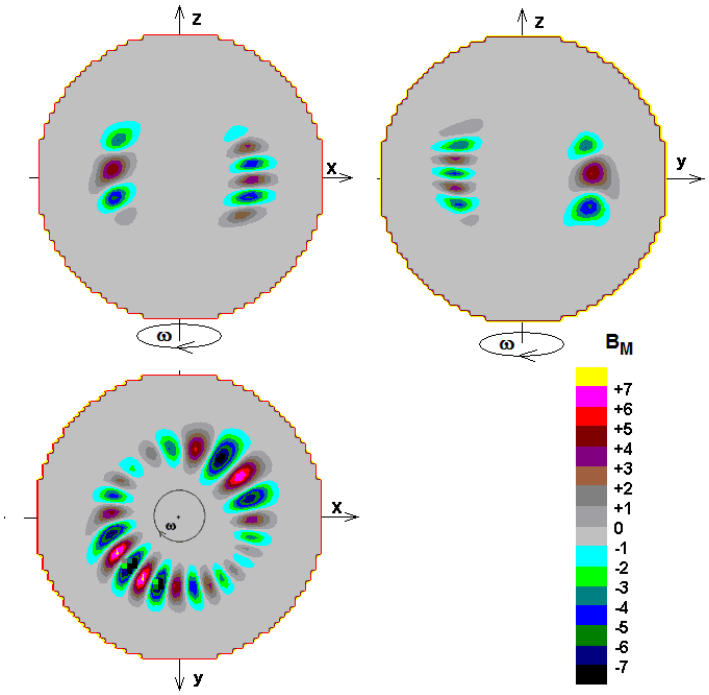


Рис. 4. Распределение магнитной самоиндукции в ядре, вызванное течениями расплава в жидком ядре

1. *Дода Л.Н.* Эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений / Л.Н. Дода, В.Л. Натяганов, И.В. Степанов // Доклады Академии наук: сер. Геофизика – 2013.– Т. 453.– № 5.– С.551-557.

2. *Doda L.N.* Seismotectonics and Ground-Space Monitoring of Signs of Natural Disasters in the Earth / L.N. Doda, A.A. Malashin, V.L. Natyaganov, I.V. Stepanov // Acta Astronautica.– 2015.– V.109.– P.254-263.

3. *Дода Л.Н.* Наземно-космический мониторинг и прогноз землетрясений / Л.Н. Дода, О.В. Мартынов, Л.А. Пахомов, В.Л. Натяганов, И.В. Степанов // Система "Планета Земля": Русский путь: Рублев-Ломоносов-Гагарин.– М.: ЛЕНАНД, 2011.– С.128-143.

4. *Дода Л.Н.* Космогеофизическая концепция прогноза землетрясений / Л.Н. Дода, В.Л. Натяганов, И.В. Степанов, А.А. Чайка // Газовая и волновая динамика: выпуск 5.– М.: Айрис-пресс, 2013.– С. 167-197.

5. *Дода Л.Н.* Геосейсмическое эхо солнечных бурь, или Землетрясения рождаются на Солнце // Новости космонавтики.– 2003.– Т.13.– № 6(245).– С.56-59.

6. *Холодова С.Е.* Квазигеострофические движения во вращающемся слое электропроводной жидкости // Прикладная механика и техническая физика.– 2009.– Т.50.– №1.– С.30-41.

7. *Альфвен Г.* Космическая электродинамика / Г. Альфвен, К.-Г. Фельтхаммар.– М.: Мир, 1967.– 260 с.

8. *Соловьев С.В.* Моделирование конвекции в жидком ядре Земли / С.В. Соловьев, Л.С. Гринкруг // Вестник ДВГСГА. Естественнонаучные знания.– 2011.– № 2(9).– 89-105.

9. *Краузе Ф.* Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо / Ф Краузе., К.-Х. Рэдлер.– М.: Мир, 1984.– 314 с.

10. *Решетняк М.Ю.* Моделирование в геодинамо. – Saarbrücken: Ламберт Академик Паблишинг, 2013.– 180с.

11. *Овчинников В.М.* О скорости относительного вращения внутреннего ядра Земли / В.М. Овчинников, В.В. Адушкин, В.А. Ан // Докл. РАН. – 1998.– Т.362.– №5.– С.683-686.

12. *Song X.* Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core / X. Song, R.G. Richards // Nature.– 1996.– V.382.– №6588.– P.221.

УДК 622.014.2: 550.835.41

ЯДЕРНО–ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ «ON–LINE» КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РУДЫ, ПОСТУПАЮЩЕЙ НА ЖЕЗКАЗГАНСКУЮ ОБОГАТИТЕЛЬНУЮ ФАБРИКУ № 1

О.С. Ефименко[1], С.А. Ефименко[2], В.С. Портнов[3], А.Д. Маусымбаева[3]

[1] НТУ «Харьковский политехнический университет», г. Харьков, Украина);

[2] ТОО «Корпорация Казахмыс», г. Жезказган, Казахстан, serg_yef@mail.ru;

[3] – Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан, aliya_maussym@mail.ru

В результате исследований в производственном масштабе реализован «on–line» контроль качества полиметаллической руды, поступающей на Жезказганскую обогатительную фабрику № 1, с балансовыми компонентами меди, цинка, серебра и свинца. Получена возможность увеличения достоверности распределения металлов между поставщиками руды. Оперативность «on–line» контроля повышена с 5÷12 часов до 10 мин.

NUCLEAR GEOPHYSICAL TECHNOLOGY OF ORE QUALITY «ON-LINE» CONTROL ARRIVING AT ZHEZKAZGAN PROCESSING PLANT NUMBER 1

O.S. Yefimenko[1], S.A. Yefimenko[2], V.S. Portnov[3], A.D. Maussymbayeva[3]

[1] NTU «Kharkov Polytechnic University», Kharkov, Ukraine);

[2] LLC «Kazakhmys Corporation», Zhezkazgan, Kazakhstan, serg_yef@mail.ru;

[3] – Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan, aliya_maussym@mail.ru

As a result of research in the production scale realized «on-line» quality control of polymetallic ore arriving at Zhezkazgan processing plant number 1, with balance components of copper, zinc, silver and lead. We get the opportunity to increase the reliability of the distribution of metals between suppliers of ore. Efficiency of «on-line» control increased from 5 ÷ 12 hours to 10 minutes.

Жезказганские обогатительные фабрики №1 (ЖОФ–1, год постройки – 1953, проектная мощность – 8,0 млн. т /год) и №2 (ЖОФ–2, год постройки – 1963, проектная мощность 14,0 млн. т /год) ПО «Жезказганцветмет» ТОО «Корпорация Казахмыс» перерабатывают руду, поступающую с шахт и карьеров жезказганской рудничной промышленной площадки (месторождение медистых песчаников Жезказган), а также с рудника Жомарт (месторождение медистых песчаников Жаман – Айбат, 160 км на юго–восток от г. Жезказгана, расстояние транспортировки 169,6км). В свою очередь, с жезказганской рудничной промышленной площадки руду на ЖОФ – 1, 2 поставляют три рудника подземной добычи (Южный, Степной, Восточный) и один рудник открытых горных работ (Северный): шахты: 55, 57, 67 – портал, 67 – бункер, 73-75 – портал, Анненская, западный портал; карьеры: Акчий – Спасский, Итауыз, Кресто, Карашошак. Вещественный состав руд обоих месторождений относительно простой. Запасы на месторождении Жезказган утверждены по меди, свинцу, цинку – основные элементы; серебру, кадмию, сере, рению – сопутствующие элементы. Запасы на месторождении Жаман – Айбат утверждены по меди, свинцу, цинку – основные элементы, серебру и рению – сопутствующие элементы.

В связи с большим числом поставщиков руды на ЖОФ – 1, 2, в ранг важнейшей производственной задачи превращается задача объективного распределения меди в концентрате между рудниками, шахтами и карьерами. Это распределение пока производится по данным входного контроля качества руд, который организует ОТК.

Контроль качества руды, поступающей на ЖОФ–1, 2, производится по следующей схеме: руда, прошедшая дробилки крупного дробления типа 900/160 (ЖОФ–1) и ККД 1500/1800 (ЖОФ–2), опробуется с интервалом 3–4 минуты с помощью полуавтоматических пробоотборников; отобранные пробы в конце смены доставляются в пробоподготовительное отделение ОТК на ЖОФ–2; готовые к анализу пробы направляются в экспресс–лабораторию на энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный (EDXRF) спектрометр РЛП–21Т

казахстанского производства (ТОО «АспапГео», г. Алма–Ата). Быстродействие данной схемы, несмотря на то, что последним звеном всей цепочки опробования является экспресс – анализатор, а не химический анализ, – от 5 до 12 часов. Действующая схема не в состоянии реализовать входной «on–line» контроль качества руд. Более того, в процессе исследований по внедрению режима геофизического «on–line» контроля было установлено, что и представительность опробования по такой схеме оставляет желать лучшего.

Мировой опыт свидетельствует о том, что в условиях рыночной экономики организовать эффективный обогатительный передел без «on–line» контроля качества поступающего сырья нельзя. Именно это обстоятельство автоматически возводит внедрение «on–line» контроля на ЖОФ – 1, 2 в ранг наиболее актуальных производственных задач.

Задача по организации «on–line» контроля на ЖОФ – 1, 2 сильно осложняют такие факторы, как: большая крупность (класс – 250мм) кусков руды, которую предстоит опробовать (рис. 1); необходимость в определении в рудах содержаний серебра в диапазоне содержаний от 2–3 до 50 ppm.

А

Б

Рис. 1. – Руда на конвейерах №1А на ЖОФ–1 (А) и №1 на ЖОФ–2 (Б)

Мировой опыт организации «on–line» контроля на обогатительных фабриках однозначно рекомендует использовать для этих целей рудоконтролирующую станцию (РКС). Рынок РКС весьма многообразен – это рентгенофлуоресцентные РКС: РКС «СТАРК» (ООО «КрасРадос», Красноярск), РКС – КМ (ТОО «Технорос», Красноярск), Online Conveyor XRF Analyzer Con X – 03 (Baltic Scientific Instruments Ltd, Латвия), РКС АРП–1Ц (ООО «Теханалитприбор», Москва), РКЦ – 1М (ОАО «НИИТФА», Москва), РКС–А («INTEGRA GROUP», Москва); РКС на гамма–нейтронно–активационном методе анализа (PGNAA): CB Omni (Thermo Fisher Scientific, Австралия), GEOSCAN (Scantech. Австралия), NITA II (ScanMin Africa, Южная Африка), EBA 1 – 2 CE (ENCE GmbH, Швейцария); РКС на базе БИК спектрометра SpectraFlow Crossbelt (SpectraFlow Analytics Switzerland, Швейцария); РКС на базе спектроскопии лазерно–индуцированного пробоя (LIBS) MAYA – 6060 (Laser Detect System – LDS, Израиль).

Однако обозначенные выше факторы, заметно осложняющие практическую реализацию поставленной аналитической задачи, резко сократили список РКС, которые можно рекомендовать к применению в Жезказгане. При этом, надо четко понимать: подавляющее большинство РКС, представленных на рынке, при анализе многокомпонентных полиметаллических руд цветных металлов эффективны лишь при крупности руды < 40÷50 мм. Задача по определению серебра вообще укорачивает этот список до нескольких единиц.

Проанализировав возможности адаптации РКС, имеющихся на рынке, к реалиям ЖОФ – 1, 2, мы остановили свой выбор на РКС РЛП–3–02 (ООО «Геотех», С–Пб, директор Королев О.А.), которая имеет ряд преимуществ перед другими РКС, а именно: наличие двух

рентгеновских трубок (рис. 2А) – это позволяет существенно увеличить площадь «пятна обзора» поверхности руды на ленте конвейера («пятна» такого размера нет больше ни у одной РКС) и повысить достоверность опробования; способность реально определять содержания серебра в рудах в диапазоне 2–3 ÷ 50 ppm (рис. 2Б). Нами было учтено, что РКС РЛП–3–02 внедрена: в ОАО «Горнорудная Компания «АИР» (п. Восток, Приморский край, Россия), где производит сортировку руд в автосамосвалах «БелАЗ» по содержаниям меди и вольфрама; на ЗИФ ЗАО «Серебро Магадана», где используется для опробования руд на серебро на ленте конвейера. Кроме того, РКС–3–02 очень устойчиво работает на крупнокусковой (200÷400мм) руде и весьма надежна и неприхотлива в эксплуатации.

РКС РЛП–3–02 изготовляется в едином корпусе необходимой геометрии и комплектации и включает: кожух герметичный, оснащенный специальным вентилятором и терморегулятором; полупроводниковый Si–PIN детектор производства США; усилитель; аналого–цифровой преобразователь (АЦП); контроллер для формирования сигнала на ЭВМ; рентгеновский излучатель. Весь комплект РКС РЛП–3–02 предварительно испытывается на вибрацию.

А

Cu, %	Pb, %	Zn, %	Ag, г/т
0,889	0,0104	0,147	26
0,906	0,0703	0,184	9,31
1,172	0,0302	0,0194	16,5
1,008	0,0949	0,149	15,4
1,425	0,0536	0,0658	27,1

Б

Рис. 2. – Вид платы РЛП–3–02 (А) и фрагмент таблицы содержаний металлов (Б)

Интерес представляют также и другие технические характеристики РКС РЛП–3–02: определяемые элементы: Cu, Pb, Zn, Ag, Fe, As, Mo, Sn, и другие (пустая лента конвейера диагносцируется по содержаниям Zn и Sb); расстояние между зондом РКС и поверхностью руды в самосвале или конвейере – 0,3 ÷ 0,7м; размер «пятна опробования» – 0,4 х 0,5м при среднем значении геометрии; полупроводниковый Si – PIN детектор марки RX–100CR «AMPTEK» (США); материал анода рентгеновской трубки – W, Re; фильтр первичного излучения – медный, толщиной 450÷500мкм, с коллиматором; источник первичного рентгеновского излучения – малогабаритный рентгеновский аппарат «Модуль – 50» фирмы «Флэш электроникс» (Москва, Россия); сетевой протокол передачи данных – TCP; внешние Wi – Fi трансмиттеры с внешними антеннами, поддерживающие связь на расстояние до 500м; встроенный контролер типа E – 207 с расширенным температурным диапазоном от – 20ºС до +60ºС без принудительного охлаждения; термоэлектронное охлаждение; расстояние до управляемого компьютера – до 100м; время проведения единичных измерений – до 30 сек; температура окружающей среды – от –40 до $+40^0$С; режим работы – круглосуточный.

Одной из главных проблем для эффективного производственного использования РКС на ЖОФ – 1, 2 являлась компенсация эффекта переменного профиля руды на ленте конвейера и наличия на ленте крупных кусков руды. Во многих РКС эта проблема решается за счет использования специального ультразвукового датчика. В РКС РЛП–3–02 для этих целей используется некогерентная составляющая рассеянного излучения (точнее: некоторый участок спектра некогерентного излучения – своего рода «know – how»).

РКС РЛП–3–02 работает в режиме сканирования поверхности руды на ленте конвейера. Время непрерывного сканирования может достигать 30сек, затем небольшая пауза до 5 сек. Отбор результатов опробования с РКС производится путем ввода времени

начала и окончания опрокидывания состава с рудой в рабочем окне на мониторе компьютера РКС. После этого на экран монитора выдаются содержания меди, свинца, цинка и серебра.

РКС РЛП–3–02 была запущена в работу в тестовом режиме декабре 2013 года на «тяжёлом» конвейере №1 ЖОФ–2 (рис. 3А). Исследовались: надежность работы РКС в условиях интенсивной эксплуатации; корректность градуировки РКС путем сопоставления данных рентгенофлуоресцентного опробования и вагонного опробования ОТК ЖОФ–2.. Положительные результаты этих исследований сделали возможным перенос РКС (ноябрь 2014 года) на «тяжелый» конвейер №1А ЖОФ–1 (рис. 3Б) для решения более важной производственной задачи. Дело в том, что через конвейер №1А ЖОФ–1 транспортировалась руда рудника Жомарт ПО «Жомарт» и рудников Южный и Анненский ПО «Жезказганцветмет» и необходимо было обеспечить объективное распределение меди между двумя производственными объединениями ТОО «Корпорация Казахмыс» – ПО «Жомарт» и ПО «Жезказганцветмет».

А **В**

Рис. 3. – Места установки РКС РЛП–3: ЖОФ–2 (А) и ЖОФ–1 (Б)

На конвейере № 1А ЖОФ–1 РКС РЛП–3–02 15 дней отработала в тестовом режиме. Результаты тестирования приведены в таблице 1. Они оказались хорошими.

Таблица 1. Сравнение средних содержаний меди в руде, по конвейеру №1А ЖОФ – 1 с 16 по 27 ноября 2015 года

Рудник	Содержание меди, %	
	ОТК	РЛП–3–02
ЮЖР	0,67	0,68
ЖОМАРТ	0,91	0,96

По результатам этих исследований РКС РЛП–3–02 была переведена в режим опытно – производственной апробации (декабрь 2014г. ÷ февраль 2015г.), результаты которой вошли в таблицу 3. Опытно–производственная апробация выявила ряд недочетов в работе РКС. В частности, выяснилось, что РКС работает разновекторно: занижает содержание меди в руде рудника «Жомарт» и немного завышает содержание меди в руде рудников «Южный» и «Анненский». Стала вырисовываться перспектива введения в программное обеспечение РКС двух градуировок. Пока ограничились уточнением градуировки РКС. Кроме того, пришлось принять меры по синхронизации взаимодействий работников на опрокидывателе вагонов и оператора АРМ РКС в вопросе уточнения времени начала и окончания опрокидывания руды из вагонов в приемный бункер ЖОФ–1.

Результатом всего комплекса исследований явился перевод РКС РЛП–3–02 в режим производственной апробации, в ходе которой (март–май 2015 г.) металл (медь) в опытном порядке распределялся между поставщиками руды по данным РКС (параллельно с ОТК, но с приоритетом ОТК).

Итоги работы РКС РЛП–3–02 на ЖОФ–1 в марте 2015 года и за весь период производственной апробации (15 ноября 2014г ÷ 30 апреля 2015г) приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Итоги производственной апробации РКС РЛП–3 на ЖОФ–1 в марте 2015г.

Рудник	Составы шт.	Вагонов шт.	Руда т	Содержание Cu, %		Разница Cu, %
				РКС (РЛП–3–02)	ОКК (РЛП–21Т)	
ЖОМАРТ	174	1973	230725,1	0,896	0,907	0,011
СТЕПНОЙ	5	85	8824,7	0,551	0,490	-0,061
ЮЖР	89	1122	119380,3	0,665	0,763	0,098
Март, 15г	**268**	**3180**	**358930,1**	**0,809**	**0,847**	**0,038**

Таблица 3. Итоги производственной апробации РКС РЛП–3–02 на ЖОФ–1 (11.2014г ÷ 04.2015г)

Месяц, год	Составы шт	Вагонов шт.	Руда, т	Содержание Cu, %		Разница Cu, %
				РКС (РЛП–3–02)	ОКК (РЛП–21Т)	
Ноябрь, 14г	141	1522	166517,3	0,875	0,796	-0,080
Декабрь, 14г	234	2754	298158,2	0,883	0,769	-0,114
Январь, 15г	183	1943	211640,0	0,898	0,804	-0,094
Февраль, 15г	330	3063	340999,4	0,982	0,922	-0,060
Март, 15г	268	3180	358930,1	0,809	0,847	0,038
Апрель, 15г	388	3790	423889,2	0,783	0,880	0,097
Итого	**1544**	**16252**	**1800134,2**	**0,864**	**0,846**	**0,018**

Как видно из таблицы 2, по основным поставщикам руды (рудники «Жомарт» и «Южный») РКС стала занижать содержания меди (при некотором перекосе в сторону «Южного» рудника). При этом было достигнуто минимальное расхождение средних содержаний меди по данным РСК и ОТК за все время работы РКС на конвейере № 1А.

В апреле 2015 года величина расхождения выросла, но тому причиной стали организационные вопросы.

Большая работа была проведена по включению РКС РЛП–3–02 в единую компьютерную сеть ЖОФ – 1, 2. Теперь результаты работы РКС доступны в режиме «on–line» большой группе пользователей.

По результатам всех этапов испытаний принято решение о внедрении РКС РЛП–3–02 на остальных трех «тяжелых» конвейерах ЖОФ – 1, 2.

В результате совокупности проведенных исследований и экспериментов удалось:

1. Реализовать в производственном масштабе «on–line» контроль качества полиметаллической руды, поступающей на ЖОФ–1, по четырем (Cu, Pb, Zn, Ag) балансовым компонентам с использованием EDXRF рудоконтролирующей станции РЛП–3–02.

2. Повысить оперативность «on–line» с 5÷12 часов до 10 мин.

3. Существенно повысить представительность опробования руды в целом (сейчас опробуется весь объем руды, проходящий по конвейеру № 1А).

4. Повысить достоверность распределение металлов между поставщиками руды.

5. Расширить сферу применения ядерно–геофизических технологий опробования руды в ТОО «Корпорация Казахмыс».

УДК 551.24.035+551.243.12:553.411 (575.123)

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ В ГУЗАКСАЙСКОМ ГРАБЕНЕ (ЧАДАКСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ, ЧАТКАЛО-КУРАМИНСКИЙ РЕГИОН)

***Б.О. Жанибеков, М.К. Турапов, Н.Ф. Умматов**, jonibekovbobur@mail.ru*

Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт минеральных ресурсов» Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Рассматриваются результаты экспериментальных работ по изучению тектонофизических особенностей и геодинамических условий формирования золотого оруденения в Гузаксайском грабене. Определены геологические причины, влияющие на характер распределения полей тектонических напряжений. Рассматривается взаимосвязь тектонического состояния грабеновой структуры с процессами рудообразования.

TEKTONOPHYSIC AND THE GEODYNAMIC CONDITIONS OF PLACEMENT OF ORE-GRADE GOLD IN GUZAKSAYSKY GRABEN (CHADAKSKY ORE FIELD, CHATKALO-KURAMINSKIY REGION)

***B.O. Janibekov, M.K. Turapov, N.F. Ummatov**, gpmiimr@evo.uz*

"Scientific – Research Institute of Mineral Resources" State Enterprise, Tashkent, Uzbekistan

Annotation. Results of experimental works on studying of tektonophysic characteristics and geodynamic conditions of ore-grade gold formation in the Guzaksaysky graben are considered. The geological reasons influencing nature of distribution of tectonics tresses fields are defined. The interrelation of a tectonic condition of graben structure with ore formation processes is considered.

1. Изучение тектонической напряженности участка земной коры, под воздействием которой формировались тектонические структуры и происходила деформация пород, имеет важное значение для расшифровки закономерностей формирования и размещения эндогенного оруденения. Однако, в силу объективных причин непосредственное изучение тектонических сил и напряжений, существующих в той или иной части геологического пространства в период развития, в настоящее время уже невозможно. Как показал М.В. Гзовский изучение некоторых аспектов тектонических процессов возможно с помощью моделирования. Кроме этого, оно позволяет решить одну из важнейших задач тектонофизики – изучение полей тектонических напряжений, возникающих под воздействием тектонических сил и зависящих от состава, свойства и строения геологической среды. Именно эти факторы – геологическая среда и ее неоднородности (структуры) в комплексе предопределяют пространственное положение эндогенного оруденения, масштаб его проявления, форму его размещения и другие особенности.

В связи с проблемой по укреплению минерально-сырьевой базы золота в Чадакском горнорудном районе одним из решений ее явилось исследование тектонофизических особенностей структур Гузаксайского грабена и определение степени их влияния на размещение золотого оруденения.

2. В геологическом строении Чадакского рудного поля участвуют вулканогенные и интрузивные образования палеозоя, которые по степени дислоцированности делятся на три структурных яруса: нижний – объединяет среднепалеозойские образования; средний – мощные толщи вулканогенных и малых интрузивных образований (андезит-дацитовая, дацит-андезитовая, липаритовая формации); верхний - объединяет вулканогенные отложения трахилипаритовой формации, дайковые образования.

Тектоническое строение рудного поля определяется сочетанием разломов различного генезиса и возраста со складчатыми структурами. Одним из основных тектонических элементов является Гузаксайский грабен, протягивающийся с севера на юг в восточной части рудного поля и осложненный как продольными, так и поперечными разломами. Грабен контролирует месторождение Гузаксай, рудные участки Мазар и Боматсай. Их минералогическая особенность определяется наличием золота в кварцевых, кварц-карбонатовых и кварц-гематитовых жилах.

Граничными структурами грабена являются Гузаксайский и Акбулак-Каракутанские крутопадающие разломы. Поверхность разломов волнистая и осложнена субширотными поперечными разрывами. В центральной части грабена сформировано месторождение Гузаксай. Пространственное распределение его оруденения в виде жилообразных крутых и пологих рудных тел ограничиваются граничными разломами грабена. На севере от месторождения Гузаксай расположены еще два рудных участка, где их оруденение пространственно ограничивается граничными разломами грабена.

3. **Цель исследований:** изучение тектонофизических и геодинамических условий формирования рудоконтролирующих структур и золотого оруденения в Гузаксайском грабене. На основе геологических, картографических материалов составлены структурные основы моделей грабена в масштабе 1:10000; 1 вариант основы отражает структурную обстановку площади грабена до процессов рудообразования; 2 вариант основы – структурную обстановку рудного этапа развития грабена.

Результаты исследований: в первом варианте эксперимента в модель внесены 3 элемента: 2 из них имитируют граничные структуры грабена – Акбулак-Каракутанский и Гузаксайский разломы; третий – поперечные ветви Джулайсайского разлома. Направление граничных структур грабена субмеридиональное и совпадает с направлением главных сжимающих усилий, приложенных на модель, что отразилось на характере распределения и величине тектонической напряженности. Тектоническая напряженность во внутренней площади грабена во многом слабее по сравнению с внешней частью. Во внешней части господствуют поля умеренных величин напряжений с некоторыми отклонениями в сторону их уменьшения в зонах влияния поперечной ветви Джуласайского разлома. Более 95% площади грабена охвачены полями слабых напряжений. В зонах пересечений граничных структур грабена с поперечными разломами наблюдается повышение концентрации напряжений.

Геодинамическая обстановка до периода рудообразования указывает, что при региональных тектонических усилиях сжатия активность проявили поперечные структуры. В зонах их пересечения с граничными элементами грабена произошли смещения по ним. Так как морфология граничных структур грабена на севере изогнутая, то под воздействием усилий сжатия в этих участках наблюдается проявление локальных смещений, формируя вдоль структур зоны локального растяжения. Тектоническая активность, наблюдаемая в поперечных структурах, способствовала смещению в северо-западном направлении тектонических блоков, образованных ими совместно с граничными элементами грабена. Эта активность вызвала нейтрализацию тектонической напряженности как вдоль разломов, так и внутри тектонических блоков.

Южная часть грабена, тектонически пассивная, активность ее граничных элементов не наблюдается. Причина – прямолинейная морфология разломов и простирание их параллельно направлению сжимающих усилий.

Основу второго варианта эксперимента составляют элементы, имитирующие рудоконтролирующие структуры грабена. В рудном этапе грабен был осложнен системой субпараллельных поперечных структур, придавших ему клавише подобную морфологию.

Серия северо-западных поперечных структур разбила грабен на мелкие блоки и при региональных тектонических деформациях активизировалась по часовой стрелке.Активность вызвала смещение блоков, что отразилось на характере распределения тектонической напряженности и, в целом, по всей внутренней площади грабена и отдельно взятого тектонического блока. Осложнение структурного строения грабена не отразилось на общем тектоническом состоянии грабена. Как в первом, так и во втором варианте эксперимента оно остается тектонически ослабленным с преобладанием полей слабых величин и нейтральных зон. Сами граничные элементы грабена остаются тектонически ослабленными. Многочисленные нейтральные зоны, образованные вдоль них, указывают на проявления локальных смещений в пределах отдельно взятых участков. Активность северо-западных

разломов вызвала смещение блоков, а это вызвало миграцию усилий сжатия в северо-западном направлении и концентраций напряжений в участках пересечений разломов.

4. Одной из ключевых позиций при тектонофизических исследованиях по моделированию полей напряжений в структурах рудных полей и месторождений является определение степени влияния напряжений на геологические процессы, в том числе на эндогенное рудообразование, что соответствует принципу тектонофизического моделирования М.В. Гзовского – статистический анализ результатов моделирования [1-2].

В прогнозных построениях в пределах Чадакского рудного поля было выделено пять позиций тектонофизически и геолого-структурно благоприятных для обнаружения новых рудных концентраций. Три позиции выделены в пределах Гузаксайского грабена. Основным тектонофизическим показателем при выделении позиции явилось понижение напряженности до минимума.

Как показывает опыт изучения закономерностей формирования рудных полей месторождений Узбекистана, подавляющее большинство золоторудных месторождений (95%) пространственно приурочено к полям пониженных величин напряжений и к нейтральным зонам. Не является исключением и Чадакское рудное поле с его двумя месторождениями (Гузаксай, Пирмираб) и рудопроявлениями.

При анализе результатов моделирования полей напряжений в структурах грабена, в отдельных его площадях – рудопроявления Мазар и Боматсай выявлена взаимосвязь формирования золоторудных жил с полями слабых величин напряжений, с нейтральными зонами. Этот факт был переведен в разряд оценочных критериеви в комплексе со структурным фактором и геодинамической обстановкой использовался при оценке перспектив Гузаксайского грабена.

Следует помнить, что на рудопроявлениях Мазар и Боматсай рекомендовано изучить их нижние горизонты, зоны пологих межформационных структур, контактовых зон для обнаружения в них полостей приоткрываний. Пространственное положение кварцево-рудных тел, их взаимосвязь с тектонофизической напряженностью, взаимоотношением с разрывными структурами, тектоническая активизация разломов, в особенности в вертикальном направлении и геодинамическая обстановка в комплексе указывают на наличие такого факта контроля оруденения. И если учесть, что на месторождении Гузаксай эти пологие структуры в рудном процессе перешли в разряд рудовмещающих, благодаря образованию по ним полостей приоткрываний, то и на Мазаре, Боматсае была возможность формирования приоткрытых граней по пологим разрывам.

Структурная особенность южной части грабена заключается в осложнении его субпараллельными диагональными разломами, разбивающими площадь на ряд тектонических блоков. Активность диагональных разломов в виде сдвига отразилась на перемещении блоков относительно друг друга, что предопределило характер распределения тектонических напряжений как вдоль разломов так и по всей площади каждого блока. Разнонаправленность тектонических перемещений по разломам в комплексе со структурными элементами (пересечения разломов) формировали зоны локального растяжения на фоне региональной деформации грабена. Все участки локального растяжения характеризуются падением напряжения до 0. Учитывая, что на месторождении Гузаксай с нейтральными зонами и полями слабых напряжений связана локализация оруденения,то в южной части грабена в аналогичных структурно-тектонических позициях и зонах локального растяжения мы вправе ожидать обнаружения новых рудных скоплений. В пределах южной части грабена с учетом геолого-структурных особенностей, геодинамической ситуации и тектонофизических характеристик выделили 2 позиции, благоприятных для обнаружения новых рудных объектов.

Литература

1. Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоники Байджансайского антиклинория. М.: АН СССР. 1963. – 516 с.
2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. – 536 с.

УДК 551.24:550.34

ОБЩЕКОРОВЫЕ ТРАНСПРЕССИВНЫЕ СДВИГИ ПАЛЕООКЕАНИЧЕСКОГО СЕКТОРА ЮЖНОГО УРАЛА

С.Е. Знаменский, *Znamensky_Sergey@mail.ru*
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии Уфимского научного центра Российской академии наук, г. Уфа, Россия

В палеоокеаническом секторе южноуральского орогена выделены Джетыгаринско-Троицкая и Восточная общекоровые транспрессивные зоны с позитивной цветочной структурой

TRANSCRUSTAL TRANSPRESSIONAL ZONES OF PALEOOCEANIC SECTOR OF THE SOUTHERN URALS

S.E. Znamensky
Institute of Geology Ufa Science Centre Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

The Dzhetygara-Troitsk and the East transcrustal transpressional zones with positive flower structure in the paleooceanic sector of the Southern Urals orogen is determined

По результатам региональных структурных исследований, интерпретации сейсмических материалов по профилю УРСЕЙС-95 и обобщения данных предыдущих работ в восточной части южноуральского орогена выделены две близмеридиональные транспрессивные зоны общекорового уровня, имеющие в разрезе позитивную цветочную структуру: Джетыгаринско-Троицкая и Восточная. Их формирование происходило на заключительных стадиях позднепалеозойской коллизии в условиях регионального северо-запад–юго-восточного (в современных координатах) сжатия восточных зон орогена [1, 2].

Джетыгаринско-Троицкая или Зауральская зона представляет собой поднятие, сложенное метатерригенными толщами предположительно позднедокембрийского возраста. Ее ограничениями служат Джетыгаринский (с запада) и Тобольский (с востока) левосторонние разломы. Волновое поле в этой части орогена по данным профиля УРСЕЙС-95 характеризуется двумя главными отличительными особенностями (рис.). Первая из них связана с наличием в средней и нижней коре мощных зон рефлекторов восточной вергентности, входящих в состав Карталинского пакета отражений (КПО). Эти группы отражающих площадок большинством исследователей отождествляются с надвигами [8]. Вторая особенность волнового поля заключается в присутствии в интервале пересечения Джетыгаринско-Троицкого поднятия крутопадающей клиновидной в разрезе зоны разрыва сплошности и деформаций КПО. Зона отчетливо выражена в сейсмической записи на времени 2-13,5 сек и на времени 13-13,5 сек достигает поверхности МОХО. Анализ сейсмических материалов позволил выделить в зоне серию вторичных сдвигов, которые после экстраполяции до современной поверхности совпали с положением разрывных нарушений, выделенных предыдущими исследователями. Нами она интерпретируется как левосторонний транспрессивный сдвиг с позитивной цветочной структурой (структурой пальмового дерева). Сдвиг представлен на глубине субвертикальной сосредоточенной разломной зоной, сменяющейся кверху системой бивергентных разрывов.

На левостороннюю кинематику разрывов, образующих позитивную цветочную структуру, и существование в ее пределах условий транспрессии указывают результаты тектонофизических исследований. По граничному Джетыгаринскому разлому и вторичным разрывам зоны (Западно-Кулевчинскому-I, Западно-Кулевчинскому- II и др.) реконструировано несколько фаз движений с левым знаком. Причем с наиболее ранними смещениями связано формирование вторичных парагенезисов транспрессивного типа, представленных северо-восточными складками, взбросами и надвигами, имеющими по сравнению с основным разломом больший азимут простирания.

Транспрессия, как известно, характеризует деформацию, при которой зона простого сдвига испытывает поперечное сжатие. Экспериментально показано, что под действием транспрессивных нагрузок в зонах разломах формируются компенсационное валообразное поднятие и ветвящиеся разрывы со взбросовой (надвиговой) компонентой смещения [7].

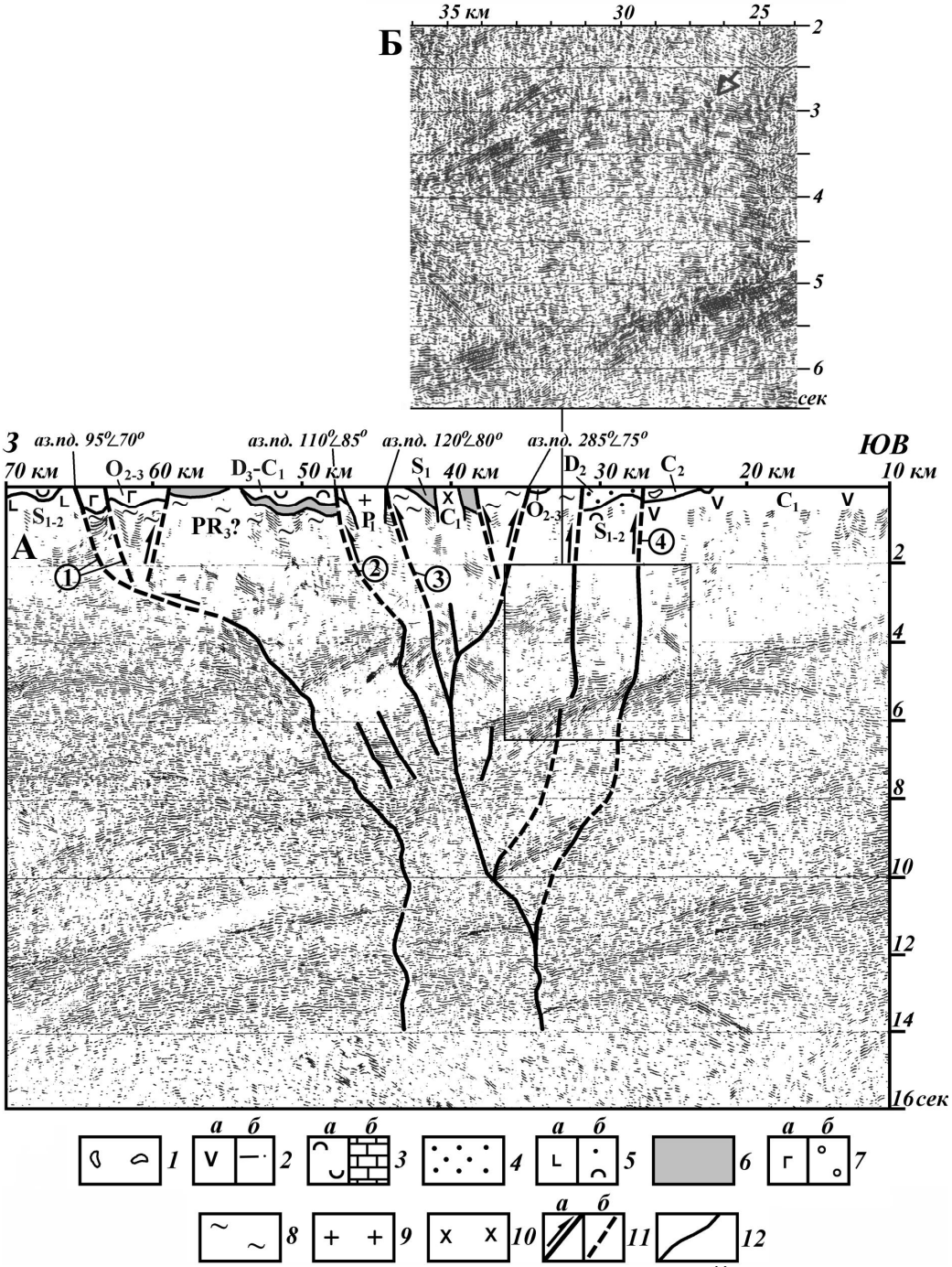


Рис. 2. Временной разрез восточной части профиля УРСЕЙС-95 (А) и его фрагмент в районе ПК 25-35 км (Б). А – по [3], Б – по [4]. Сейсмические материалы по [8].

1 – полимиктовые конгломераты, песчаники и алевролиты (C_2); *2* – вулканогенные (*а*) и терригенно-карбонатно-кремнистые (*б*) отложения (C_1); *3* – кремни, алевролиты и песчаники (*а*) и известняки (*б*) (D_3-C_1); *4* – терригенные флишоидные отложения (D_2); *5* – вулканогенные (*а*) и вулканогенно-осадочные (*б*) породы (S_{1-2}); *6* – кремни, сланцы, туффиты и базальты (S_1); *7* – вулканогенные (*а*) и терригенные (*б*) породы (O_{2-3}); *8* – метатерригенные толщи докембрийского возраста (?); *9* – граниты (P_1); *10* – диориты и гранодиориты (C_1); *11* – разломы: *а* – достоверные, *б* – предполагаемые; *12* – геологические границы. Арабскими цифрами в кружках обозначены разломы: 1 – Джетыгаринский, 2 – Западно-Кулевчинский-I, 3 – Западно-Кулевчинский- II, 4 – Тобольский. На фрагменте Б стрелкой показана гетерогенная зона, соответствующая Тобольскому разлому [4].

Разломы, образующие транспрессивный сдвиг Джетыгаринско-Троицкой зоны, судя по возрасту пород, слагающих их крылья, также обладают взбросовой составляющей. Таким образом, имеющиеся данные свидетельствуют о том, что формирование Джетыгаринско-Троицкого поднятия связано с транспрессивными деформациями.

В строении Восточной зоны, проходящей вдоль контакта Магнитогорской синформы и Восточно-Уральского поднятия, участвуют палеозойские офиолитовые, вулканогенные и осадочные комплексы. С востока зона ограничена Кацбахским разломом, а с запада – кулисно расположенными Верхнеуральским, Аблязовским и Карабулакско-Богдановским региональными разрывными нарушениями. По геологическим данным и данным сейсмической разведки МОВ граничные разломы имеют крутое встречное падение. На сейсмических разрезах МОВ они прослеживаются по падению до глубины 6-8 км [5]. В волновом поле профиля УРСЕЙС-95 граничные разломы хорошо выражены в средней и нижней коре на времени 6-18 сек зонами деформаций отражающих площадок. На времени примерно 17-18 сек они достигают поверхности МОХО. Разрывы, расположенные внутри Восточной зоны, имеют преимущественно восточное падение. Угол падения нарушений уменьшается с востока на запад. В целом разломы Восточной зоны образуют в разрезе расходящийся кверху веер. По наиболее крупным разломам (Аблязовскому, Браиловскому, Кацбахскому и др.) нами установлены две-три фазы левосторонних смещений преимущественно со взбросовой компонентой, что позволяет отнести тектонический веер к типу позитивных цветочных структур. Наиболее интенсивно левосдвиговые дислокации проявились в Уйской шовной зоне, по-видимому, представляющей собой магистральный шов Восточной зоны [6]. В плане Восточная зона характеризуется линзовидно-ромбовидным структурным рисунком, отражающим ее дуплексное строение. По простиранию она состоит из доминирующих транспрессивных и подчиненных транстенсивных дуплексов. Для транпрессивных дуплексов характерны ассоциации вторичных близмеридиональных, северо-восточных и субширотных надвигов, взбросов, косых разломов, формирующих в разрезе позитивные цветочные структуры более высоких порядков, а также конические складки северо-восточного простирания. Такое строение имеют, например, интервалы Восточной зоны на территории Александринского рудного района и заповедника Аркаим. Транстенсивным дуплексам свойственен вторичный парагенезис сдвигов и косых разрывов (в основном сбросо-сдвигов, главным образом, близмеридионального и северо-западного простираний, формирующих в разрезе негативные («тюльпановидные») структуры.

Литература

1. Знаменский С.Е. Структурная эволюция Магнитогорской мегазоны (Южный Урал) в позднем палеозое // ДАН. 2008. Т. 420. № 1. С. 85-88.
2. Знаменский С.Е., Знаменская Н.М. Структурные парагенезисы и фазы деформаций Восточно-Уральской мегазоны на широте профиля Уралсейс (Urseis –95) // Геологический сборник № 5 / ИГ УНЦ РАН. Уфа, 2006.С. 18-29.
3. Знаменский С.Е., Светлакова А.Н., Пучков В.Н. Особенности структуры Джетыгаринско-Троицкой зоны Южного Урала (по данным профиля УРСЕЙС-95) // ДАН. 2012. Т.447. № 3. С. 314-317.
4. Караев Н.А. Сейсмическая гетерогенность земной коры и ее отображение в поле рассеянных волн // Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект Уралсейс). Тверь: Изд-во ГЕРС, 2001. С. 52-61.
5. Меньшиков Ю.П., Кузнецова Н.В., Щебухина С.В. и др. Тектоника северной половины Магнитогорского прогиба по геофизическим данным // Разломы земной коры Урала и методы их изучения. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 65–78.
6. Тевелев А.В. особенности кинематики шовных зон Южного Урала как причина формирования конвергентной структуры Восточно-Уральской мегазоны // Вестник МГУ. Сер. 4. геология. 2012. № 3. С. 17-25.
7. Bartlett W.L., Friedman M., Logan J.M. Experimental faulting and folding of rocks under confining pressure // Tectonophysics. 1981. V. 79. P.255-277.
8. Echtler H.P., Stiller M., Steinhoff F. et al. Preserved Collisional Crustal Structure of the Southern Urals Revealed by Vibroseis Proviling // Science. 1996 V.274. P. 224-226.

УДК 550.8:553.9:622.31

К ВОПРОСУ О ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

Г.В. Иголкина, В.В. Дрягин, О.А. Хачай, Д.Б. Иванов, З.С. Мезенина
galinaigolkina@yandex.ru
Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. В статье определены критерии оценки нефтегазонасыщенности коллекторов, в основе которых положена динамика сейсмоакустической эмиссии на акустическое воздействие в скважинном варианте. Исследованы нелинейные параметры акустической эмиссии при волновом воздействии на фильтрационно – емкостные свойства образцов кернов из продуктивных пластов – коллекторов. Разработан новый 2D алгоритм моделирования для дифракции звука на упругом и пористом влагонасыщенном включение иерархической структуры, расположенном в *J*-ом слое *N*-слойной упругой среды.

ON THE ISSUE OF ECOLOGICALLY SECURE TECHNOLOGIES TO ENHANCE OIL RECOVERY

G.V. Igolkina, V.V. Dryagin, O.A. Hachay, D.B. Ivanov, Z.S. Mezenina
galinaigolkina@yandex.ru
Institute of Geophysics Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. The article defines the criteria for discovery of the hydrocarbon saturation collector, which are based on the dynamics of seismic acoustic emission by acoustic action in the borehole variant. Nonlinear acoustic emission parameters by wave action on the filtration properties of core samples from the reservoir - collectors. A new 2D simulation algorithm for the diffraction of the sound wave on the elastic and porous fluid saturated inclusion of hierarchic structure, located in the J-layer of the N-layered elastic medium.

Существующие технологии волнового воздействия на месторождениях нефти в комплексе с методикой определения текущего содержания нефти и воды в пластах на основе исследования эмиссионного отклика залежи на сейсмические, акустические и гидроударные импульсы, позволяли оценить перспективность скважин и продуктивных пластов к повышению извлекаемой нефти и интенсификации нефтедобычи. Применение экологически безопасной технологии повышения нефтеотдачи месторождений обеспечивает сокращение затрат на поддержание уровня нефтеотдачи. Технология включает в себя аппаратуру, позволяющую реализовать метод активного сейсмоакустического каротажа в работающих скважинах, экспрессную обработку данных, теоретическое обоснование метода в классе современных нелинейных представлений об активном воздействии на нефтенасыщенную среду [1,3,4,8].

Неразрывная связь процессов формирования залежей углеводородов с полем постоянно действующих упругих колебаний является фундаментальной основой технологии использования упругих свойств среды и параметров сейсмоакустического поля для разработки способов их обнаружения и извлечения [4].Изучение сейсмоакустической эмиссии (САЭ) в прискважинной области пласта-коллектора, обусловленной как естественными процессами, так и искусственными воздействиями на него, позволяют выявить закономерную связь свойств эмиссии с наличием углеводородов[3,8,9].

Акустическое воздействие является гарантированным способом интенсификации фильтрационных процессов при вытеснении нефти водой. Определяющими факторами увеличения коэффициента вытеснения и фазовых проницаемостей флюидов при виброволновом воздействии являются параметры микроструктуры эффективного порового пространства, изменение свойств нефти, интенсивность и время ультразвукового воздействия.

Анализ результатов показал, что независимо от коллекторских свойств пород и вязкости нефтей, акустическое воздействие способствует увеличению коэффициентов вытеснения на 4,9-18,2 %. Причем, эти эффекты отмечаются при меньших значениях числа и интенсивности циклов акустического воздействия, в коллекторах с низкими фильтрационно-ёмкостными свойствами. Отмеченная особенность свидетельствует о том, что в низкопроницаемых коллекторах увеличение нефтеотдачи за счёт АВ может быть весьма значительным.

Взаимосвязь параметров эмиссионных сигналов с геологическими характеристиками месторождений позволило установить зависимость их спектрально энергетической характеристики и доминирующих частот с поровым или трещиноватым видом фильтрационных свойств коллектора[2,6,7]. По результатам геолого-геофизической информации промысловых испытаний на приток нефти из этих пластов и сопоставления с данными КСАЭ установлено, что их продуктивность определяется поровыми и трещиноватыми типами коллекторов, которые различным образом выделяются по доминирующим частотам и динамике их энергии после акустического воздействия. Коллекторы с проницаемостью 2—12 мД обладают доминантными частотами 6—9 кГц и имеют прирост 30—40% энергии САЭ относительно фоновой, при испытаниях на приток в двух скважинах они обеспечили дебит 34-40 тонн в сутки нефтью с обводненностью, не превышающей 2%.

Так, в разрезе Тевлинско-Русскинского месторождения выявлены несколько продуктивных пластов: БС10 (2+3), БС11 (1+2), залегающих на глубинах 2500-2900 метров. Пласты сложены мелко-зернистыми песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов. Коллекторами являются песчаники и алевролиты, неколлекторами – аргиллиты и глины. Фильтрационно-емкостные свойства этих коллекторов изменяются в широких пределах: пористость от 21,2% до 26,9%, проницаемость - от 2 мД до 444 мД. [4].

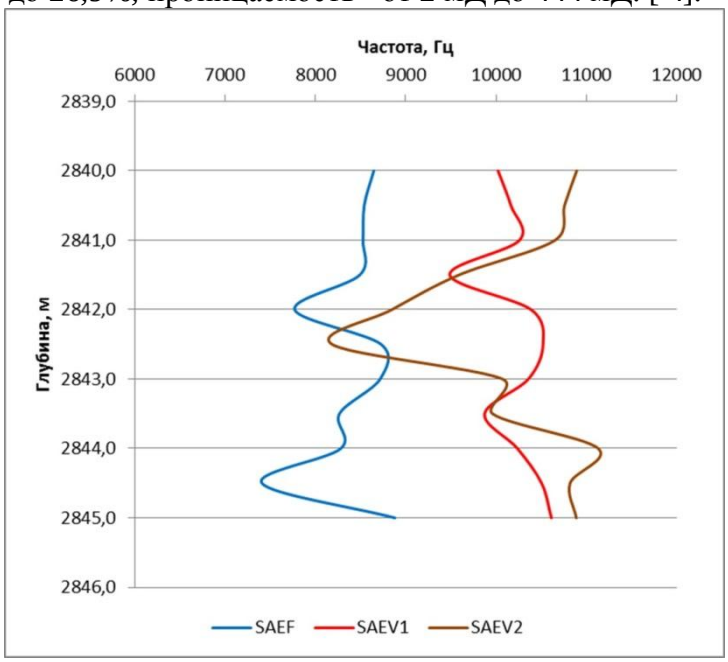


Рис. 1. Изменение доминантных частот в выбранном интервале перфорации. Тевлинско-Русскинского месторождение, скважина №5645.

При акустическом воздействии происходит изменение частотного состава дискретных импульсов. Анализируя все дискретные импульсы на записях САЭ, можно выделить доминантную частоту для конкретных точек записи в пределах выбранного интервала перфорации. Пример такого определения представлен на рис. 1. Обозначения на рис. 1: SAEF – график изменения доминантной частоты фоновой записи САЭ; SAEV1 – график изменения записи САЭ после первого акустического воздействия; SAEV2 – график изменения записи САЭ после второго акустического воздействия.

Энергия САЭ определялась в отношении к фоновой энергии, измеренной до акустического воздействия. Энергия после акустического воздействия определялась как

суммарная энергия высокочастотной составляющей сигнала САЭ, измеренной с шагом 0,5 метра по глубине скважины.

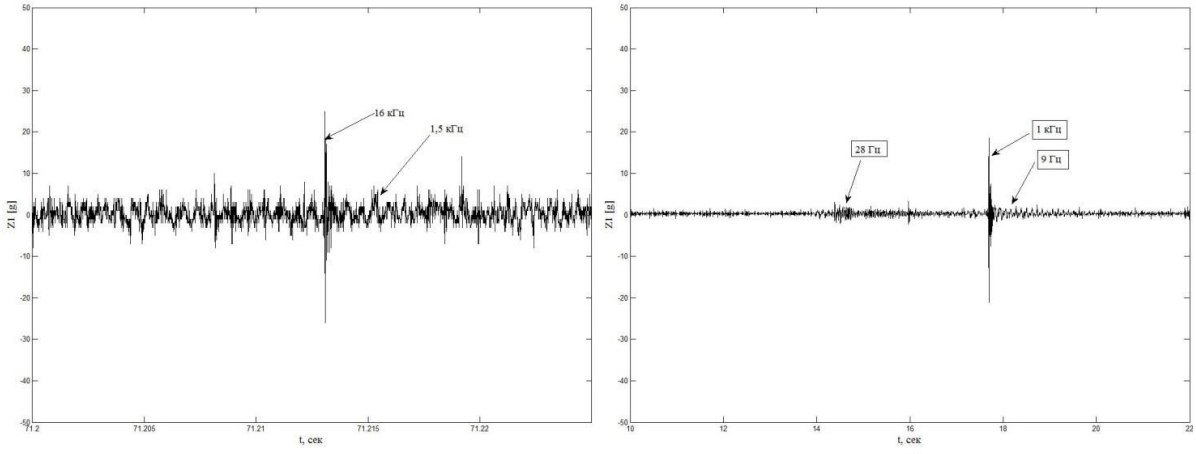
Анализ количественного увеличения величины спектральной плотности энергии было сделано с проницаемостью по данным ГИС. Для скважин Кальчинского и Тевлинско-Русскинского месторождений прирост величины спектральной плотности энергии сигнала САЭ составляет (30-100)% относительно фонового значения и уверенно интерпретируется с наличием нефти в пласте.

Сопоставление проницаемости по ГИС с естественным эмиссионным фоном показывает практическое отсутствие связи между ними, в то время как после акустического воздействия корреляция резко возрастает и может составлять десятки и сотни процентов. При этом сам коэффициент корреляции не высок, поскольку приходится сравнивать непрерывную функцию спектральной плотности энергии от глубины скважины с линейно-кусочной функцией расчетного коэффициента проницаемости Кпр, полученного по данным ГИС.

Проведены лабораторные исследования по влиянию акустического воздействия (АВ) на фазовые проницаемости по нефти (Кпрн), по воде (Кпрв) и коэффициент вытеснения (Квт) нефти водой в коллекторах терригенного типа. Во всех случаях определяли коэффициенты вытеснения для безводного периода на стадии доотмыва, промежуточные значения при каждом цикле АВ и конечный, а также соответствующие фазовые проницаемости по воде. Интенсификацию процессов вытеснения и фильтрации под влиянием АВ исследовали только на стадии доотмыва. Проведен анализ качества и систематизация результатов промыслово-геофизических и лабораторных исследований [2,7].

При достижении значений температуры и давления приближенных к пластовым условиям производилась регистрация сейсмоакустической эмиссии до и после акустического воздействия. На рис. 2а и 2б приведены примеры сигналов акустической эмиссии полученные в кернах при насыщении керосином и водой соответственно.

На рис. 2(а) приведена запись сигнала акустической эмиссии в керне проницаемостью 8,02–10,47*10^{-3} мкм^2. В опыте керн был предварительно предельно насыщен керосином и запущен процесс вытеснения керосина водой. При этом сигналы акустической эмиссии имеют затухающий импульсный характер с частотой их заполнения 16 кГц. Частоты эмиссионных сигналов в нефтенасыщенных коллекторах имеют такой же характер и доминирующие частоты в пределах 10 кГц. В процессе фильтрации керосина наблюдается сигнал несущей частоты порядка 700–1500 Гц, при замещении керосина водой эта несущая частота уменьшается по амплитуде и смещается в сторону низких частот.



а б

Рис. 2. Записи сигналов САЭ при различном насыщении

В образцах кернов рисунок 2(б) имеющих проницаемость 90,51*10^{-3} мкм^2 и 30,40*10^{-3} мкм^2, было выполнено предельное насыщение водой и сигналы записаны при подъеме горного давления в пределах 12-13 МПа, фильтрации воды в кернах не было. Так же как и в скважине, в этом керне наблюдались импульсные эмиссионные сигналы в виде волновых

пакетов с основной несущей частотой 28 Гц и 9 Гц. При этом эти импульсы чередовались или следовали за затухающими импульсами более высоких частот, однако собственная частота, которых не превышала единиц килогерц. В опытах использовались стандартные по размерам керны: диаметр 30 мм и общей длиной 90 мм[7].

Показана предпосылка возможности применения КСАЭ для количественной оценки коэффициента насыщенности. Для получения количественной зависимости между коэффициентом водонасыщенности Кв и данным КСАЭ было рассчитано уравнение множественной регрессии. Коэффициент корреляции между Кв (ГИС) и Рв (результаты испытаний) составил 0,775 [6, 8].

Было выявлено улучшение фильтрации через образцы под действием акустического поля в ходе проведения лабораторных исследований на образцах керна. Улучшения фильтрационно-емкостных свойств при акустическом воздействии отражаются в измененном эмиссионном отклике среды.

Определены критерии оценки нефтегазонасыщенности коллекторов, в основе которых положена динамика сейсмоакустической эмиссии на акустическое воздействие в скважинном варианте. Закономерность эмиссионного отклика позволила создать аппаратурно-методические основы каротажа вызванной сейсмоакустической эмиссии для определения характера насыщенности пластов коллекторов[4,5, 10].

Результаты электромагнитного индукционного мониторинга в натурных условиях позволяет сделать следующие выводы: строение массива горных пород различного вещественного состава удовлетворяет модели иерархичной дискретной среды, нам удалось проследить два иерархических уровня. Зоны дезинтеграции, выделенные по данным электромагнитного мониторинга, в околовыработочном пространстве расположены несимметрично в почве и кровле и дискретно: т.е. имеются интервалы полного их отсутствия. Максимальные изменения в массиве, находящемся под техногенным влиянием происходят именно в морфологии пространственного положения этих зон в зависимости от времени и их интенсивности[8,12].

Предложенный метод картирования и мониторинга гетерогенной сложно построенной двухфазной среды может быть использован при управлении добычей вязкой нефти в шахтных условиях и легкой нефти в субгоризонтальных скважинах. Требования эффективного по экономическим показателям и наиболее полного извлечения углеводородов на месторождениях диктует необходимость создания новых геотехнологий освоения месторождений нефти и газа, основанных на фундаментальных достижениях в области геофизики и геомеханики [11,13].

Выводы

Существующие технологии волнового воздействия на месторождениях нефти в комплексе с методикой определения текущего содержания нефти и воды в пластах на основе исследования эмиссионного отклика залежи на сейсмические, акустические и гидроударные импульсы, позволят оценить перспективность скважин и продуктивных пластов к повышению извлекаемой нефти и интенсификации нефтедобычи.

Закономерность эмиссионного отклика позволила создать аппаратурно-методические основы каротажа вызванной сейсмоакустической эмиссии для определения характера насыщенности пластов коллекторов.

Новизна исследований заключается в изучении эмиссионного отклика насыщенной пористой среды на виброволновое воздействие, которое изменяет фоновое состояние среды, вызывая в ней различные геологические процессы, сопровождающиеся разрядкой упругой энергии.

Практическая значимость заключается в необходимости решения экологически безопасной технологии повышения нефтеотдачи месторождений, а именно, существенное, на порядок, сокращение затрат на поддержание уровня нефтеотдачи, по сравнению с методами закачки химреагентов или гидроразрыва пласта. Результат исследований является новым и актуальным.

Работа частично выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований по Отделению наук о Земле Уральского отделения РАН, проект № 15-18-5-29.

Литература

1. *Дрягин В.В.* Сейсмоакустическая эмиссия нефтепродуктивного пласта// Акустический журнал.2013.Том 59, № 6. С. 744-751.
2. *Дрягин В.В., Иванов Д.Б., Иголкина Г.В., Мезенина З.С.* О лабораторных исследованиях керна и создании интерпретационных моделей нефтенасыщенности по данным каротажа КСАЭ// Глубинное строение. Геодинамика. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей. Седьмые научные чтения Ю.П. Булашевича. Материалы. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2013 г.С.115-117.
3. *Дрягин В. В., Иванов Д.Б., Нигматуллин Д.Ф., Шумилов А.В.* Сейсмоакустическая эмиссия продуктивного пласта в технологии обнаружения и извлечения углеводородов //Геофизика. 2014.№4.С.54-58.
4. *Дрягин В. В., Иванов Д. Б., Черных И. А., Шумилов А. В..* Каротаж акустической эмиссии в цикле повышения нефтеотдачи и контроля источников обводнения месторождения //НТВ « Каротажник», Тверь.2014. № 10(244) С. 57-64
5. *Дрягин В.В., Иголкина Г.В., Иванов Д.Б., Мезенина З.С., Антропова М.А.*О возможности использования метода эмиссионного каротажа при разработке нефтяных месторождений//Материалы 39-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского. Воронеж, 30 января-2 февраля 2012 г.- Воронеж, 2012.С.109-112.
6. *Иванов Д.Б.* Количественная оценка характера насыщенности по данным каротажа сейсмоакустической эмиссии//XIV Уральская молодежная научная школа по геофизике. Материалы. Екатеринбург, 2013.С.97-98.
7. *Иванов Д. Б.* Анализ параметров вызванной сейсмоакустической эмиссии по данным лабораторных исследований //XV Уральская молодежная научная школа по геофизике. Материалы. Екатеринбург, 2014.С.111-113.
8. *Иголкина Г.В., Дрягин В.В., Хачай О.А., Иванов Д.Б., Мезенина З.С.* Разработка экологически безопасной технологии повышения нефтеотдачи месторождений//Электронный журнал «Георесурсы. Геополитика. Геоэнергетика» Института проблем нефти и газа РАН,2014.Выпуск 1(9).С.1-18. © www.oilgasjpornal.ru
9. *Иголкина Г.В., Дрягин В.В., Иванов Д.Б., Мезенина З.С* Результаты использования метода эмиссионного каротажа при разработке нефтяных месторождений // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2012, № 2. http://www.ogbus.ru.
10. *O.A.Hachay,V.V. Dryagin, G.V.Igolkina, O.Yu.Khachay.* Reflection of no equilibrium two phase processes of filtration in heterogeneous media in the active seism acoustic borehole monitoring data // EGU General Assembly 2013. Geophysical Research Abstracts. Vol. 15.EGU2013-49 .Vena.2013. (indexed in Scopus)
11. *Хачай О.А., Хачай А.Ю.* Отражение процессов неравновесной двухфазной фильтрации в нефтенасыщенных иерархических средах в данных активного волнового геофизического мониторинга.// Горный Информационно-аналитический бюллетень, 2014, №4. с.232-238.
12. *Хачай О.А., Хачай А.Ю.* Моделирование сейсмического поля в акустическом приближении двухфазных иерархически неоднородных сред // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия “Вычислительная математика и информатика”, 2014, том3.,№1,с. 33-43.
13. *Hachay O.A., Khachay O.Yu, Khachay A.Yu.* New Method of active electro-magnetic induction and seismic Monitoring in Oil saturated Media.// Geophysical Research abstracts. Vol. 16, EGU2014-1007, 2014.

УДК 551.248(571.576)

ТЕКТОНОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА И АЛДАНО-СТАНОВОГО БЛОКА

Л.П. Имаева[1], Б.М.Козьмин[2], В.С. Имаев[1], Н.Н. Гриб[3]

[1]Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия, imaev@crust.irk.ru

[2]Институт геологии алмаза и благородных металлов, г. Якутск, Россия, b.m.kozmin@diamond.ysn.ru

[3]Технический институт (филиал) Северо-Восточного ФедеральногоУниверситета, Россия, Нерюнгри, grib@nfygu.ru

АННОТАЦИЯ

Исследование направлено на выявление современного структурно-тектонического плана и построение тектонодинамической модели наиболее активного в сейсмотектоническом отношении сегмента Байкальской Рифтовой Зоны (БРЗ) – ее северо-восточного фланга и сопряженной с ним системы сейсмогенерирующих структур Алдано-Станового блока, в пределах которого произошел ряд сейсмических катастроф с магнитудой более 6.0. В зонах динамического влияния региональных тектонических швов рассматриваются закономерности структурообразования и кинематические типы сопряжения активных разломов, которые образуют разломно-блоковые структуры и являются концентраторами значительных тектонических напряжений. Разрядка их проявляется в соответствии с динамикой взаимоотношения крупных тектонических блоков в виде катастрофических землетрясений (M>6.0) с определенным кинематическим типом фокальных механизмов.

TEKTONODINAMIC MODEL THE ZONE OF INTERACTION THE NORTHEASTERN SIDE BAIKAL RIFT AND ALDAN-STANOVOY BLOCK

L.P. Imaeva[1], B.M. Koz'min[2], V.S. Imaev[1] and N.N. Grib[3]

[1]Institute of the Earth's crust, Siberian Division, Russian Academy of Science, 128 Lermontova, Irkutsk 664033, Russia, e-mail: imaeva@crust.irk.ru

[2]Diamond and Precious Metals Geology Institute, Siberian Division, Russian Academy of Science, 39 Lenin Prospekt, Yakutsk, Sakha Republic (Yakutia), 677980, Russia, e-mail: b.m.kozmin@diamond.ysn.ru

[3]Technical Institute (Branch) of the Northeastern Federal University, 16 Kravchenko, Neryungri, 678960, Russia, e-mail:grib@nfygu.ru

ABSTRACT

The paper presents the modern structural-tectonic pattern and a tectonodynamic model of the zone of interaction of the most seismically active northeastern side of the Baikal rift zone (BRZ) and the conjugate system of seismogenerating structures of the Aldan-Stanovoy block, where disastrous events with M≥6.0 have been reported. Regularities in the structure formation of active faults and their kinematics are discussed. The faults form block structures accumulating significant tectonic strain. Motions between large tectonic blocks cause sudden release of the strain, which results in catastrophic events (M≥6.0) with focal mechanisms of definite kinematic type.

Сопоставление результатов сейсмотектонического изучения территории [1, 2, 3, 4], с данными измерений на геодезических полигонах в Южной Якутии [5] и материалами космического позиционирования (GPS-наблюдения) [6,7], выполненными в последние годы, подтверждает наличие контактной зоны между северо-восточным флангом Байкальской Рифтовой Зоны (БРЗ) и системой сейсмогенерирующих структур Алдано-Станового блока, в пределах которой произошел ряд сейсмических катастроф с магнитудой более 6.0 (рис. 1).

Рис. 1. Сейсмотектоническая схема северо-восточного фланга БРЗ и сопряженной системы сейсмогенерирующих структур Западно-Станового блока

Крупные глубинные региональные разломы, активизированные в кайнозое: 1 – сбросы; 2 – взбросы, надвиги; 3 – сдвиги (Хн-К – Хани-Кудулинский, Тнг – Тунгурчинский, Ч-Т – Чаро-Темулякитский, О-Н – Олёкмо-Нюкжинский, Им − Имангрский); 4 – диаграммы фокальных механизмов землетрясений с М=4.7–7.0 в проекции нижней полусферы (темными и светлыми точками обозначены выходы осей сжатия и растяжения); 5 – впадины: а – кайнозойские: Ч – Чарская, Т – Токкинская; б – мезозойская: Чул – Чульманская; 6 – границы зон взаимодействия структур; 7 – горизонтальная проекция главных осей сейсмотектонических деформаций (темные расходящиеся стрелки – удлинение, светлые – укорочения): I – режим растяжения; II, III – переход от сдвига к растяжению; IV – переход от сдвига к сжатию. Эпицентральные поля: А – Чарское, Б – Олдонгсинское (Чаруодинское), В – Олёкминское, Г – Южно-Якутское, Д – Ларбинское, Е – Тимптонское.

Алдано-Становой блок, зажатый между Забайкальским блоком, Евразийской и Амурской плитами, испытывает давление со стороны Забайкальского блока. Последний в связи с раскрытием Байкальского рифта смещается к юго-востоку со скоростью 0.5–0.7 см/год [7] и способствует перемещению Алдано-Станового блока на восток к Охотскому морю. Это не противоречит результатам триангуляционных измерений на геодинамических полигонах в районе Станового хребта, где средние скорости горизонтальных смещений реперов в восточном направлении достигают 0.3 см/год [5]. При этом в зоне контакта Забайкальского и Алдано-Станового блоков в условиях сжатия возникли определенные парагенезисы активных разломов: в осевой зоне – Чаро-Темулякитские взбросо-сдвиги, с запада – Кодаро-Удоканские правые взбросо и сбросо-сдвиги северо-восточного простирания, с востока – Западно-Становые левые сдвиги и взбросо-сдвиги северо-западного и субширотного направления. Эти разломно-блоковые структуры геометрически сопряжены между собой по кинематическому типу обратной Y-структуры.

В соответствии с ориентировкой поля тектонических напряжений (меридиональное растяжение, широтное сжатие), по северо-восточным и северо-западным разломам фиксируются сдвиго-взбросовые подвижки, а по разломам субширотного плана должны наблюдаться сбросовые смещения. Подобный тип смещений способствует появлению на внешних флангах данной структуры областей сжатия, а внутри неё – областей растяжения. Указанные соотношения находят отражение в морфоструктурных элементах современного рельефа в бассейне среднего течения р. Олёкмы и подтверждаются решениями фокальных механизмов Олёкминских землетрясений и группы Чаруода-Олдонгсинских событий на Олёкмо-Чарском нагорье. При этом вдоль долины р. Олёкмы также формируется система взбросов и надвигов противоположной вергентности к фронтальным структурам Забайкальского блока.

С юга на Алдано-Становой блок оказывает воздействие Амурская плита, которая смещается к восток-северо-востоку со скоростью 1.0–1.3 см/год [8] и поддерживает движение блока в восточном направлении. В итоге, рассматриваемые структуры одновременно смещаются к востоку, но за счет меньшей скорости движения Алдано-Становой блок отстает от Амурской плиты, что способствует развитию на их границе левых сдвигов. Это согласуется с данными геоморфологических исследований в пределах Тукурингро-Джагдинской зоны, где Южно-Тукурингрский разлом трассируется вдоль полосы контрастного сочленения Верхне-Урканской впадины и поднятия хр. Тукурингра. Здесь названный разлом смещает влево (к западу) молодые (плейстоцен-голоцен) пойменные отложения в верховьях небольших северных притоков р. Уркан (правого притока р. Зеи). Максимальная амплитуда таких смещений достигает 0.8 км. В этом случае средняя скорость горизонтальных движений по типу левого сдвига, если считать, что смещение происходило с начала верхнего плейстоцена (130 тыс. лет), будет составлять 0.5–0.6 см/год [4]. Кроме того, подвижки типа левого сдвига подтверждаются параметрами фокальных механизмов сильных землетрясений (левые сдвиги, надвиги, взбросы), отмеченных в Тукурингра-Джагдинской зоне в 1972–1989 годов.

В целом, напряженно-деформированное состояние земной коры зоны сопряжения северо-восточного фланга БРЗ (Кодаро-Удоканский блок) и Западно-Станового блока, выявленное по механизмам сильных землетрясений основных эпицентральных полей (рис. 1), характеризуется суперпозицией сжимающих и растягивающих усилий. Сдвиговые сейсмотектонические деформации (по сейсмологическим данным) в зависимости от структурно-тектонического плана сочетаются с компонентами удлинения (к западу от среднего течения р. Олёкмы) или укорочения (к востоку) земной поверхности.

В итоге, установленные закономерности в проявлении сейсмичности, характере полей тектонических напряжений и развитии определенных парагенезисов разломов, возникших на границах блоков зоны сопряжения северо-восточного фланга БРЗ (Кодаро-Удоканский блок) и Алдано-Станового блока определяют современный морфотектонический план и отражают динамические условия взаимодействия двух крупных террейнов – Забайкальского и Западно-Станового, которые перемещаются с разными скоростями и сближаются в субширотном направлении. Наибольшая концентрация землетрясений в виде сейсмических зон и эпицентральных полей наблюдается во фронтальных частях этой контактной области, возникшей между названными блоками, вдоль системы правосторонних сдвигов и сдвиго-сбросов северо-восточного фланга БРЗ и левосторонних сдвигов и взбросо-сдвигов Западно-Станового блока.

Данное научное исследование выполнено при поддержке интеграционного проекта СО РАН, гранта Министерства Науки и Образования РФ (Гос. задание № 5.1771.2014/К). Обработка сейсмотектонических данных проведена при помощи гранта РНФ N 15-17-20000.

ЛИТЕРАТУРА

1. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии. – М.: ГЕОС, 2000. – 226 с.
2. Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С., Слепцов С.В. Сейсмотектоника западной части Олёкмо-Становой области // Отечественная геология. 2004. № 4. С. 57–60.
3. Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. Механизм очагов землетрясений Байкальского региона за 1991–1996 гг. // Геология и геофизика. – 1998. – Т.39, № 11. – С. 1598–1607.
4. Николаев В.В., Семенов Р.М., Солоненко В.П. Сейсмогеология Монголо-Охотского линеамента (восточный фланг). – Новосибирск: Наука, 1979.
5. Бочаров Г.В., Замараев Н.Н. Геодезические измерения на геодинамических полигонах Южной Якутии // Геодезия и картография. 1991. № 3. С.30–34.
6. San'kov V., Déverchère J., Gaudemer Y. et al. Geometry and rate of faulting in the North Baikal Rift, Siberia // Tectonics. – 2000. – V. 19 (4). P. 707–722.
7. Calais E., Lesne O., Deverchere J., San'kov V., Lukhnev A., Miroshnichenko A., Buddo V., Levi K., Zalutzky V., Bashkuev Y. Crustal deformation in the Baikal rift from GPS measurements / Geoph. Res. Let. 1998. Vol.25. № 21. P. 4003–4006.
8. Apel E.V., Burgmann R., Steblov G., Vasilenko N., King R., Prytkov A. Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling // Geophys. Res. Let. 2006. V. 33. L 11303. P. 1–5.

УДК 553.98:553.041:552.578:550.8.05

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НЕФТЕМАТЕРИНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ С УЧЕТОМ НЕОПЛЕЙСТОЦЕНОВОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ

А.А. Искоркина [1], А.К. Исагалиева [2],В.И. Исаев[1]

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, iskorkina.a@mail.ru, isaevvi@tpu.ru

[2] Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, Алмата, a_isagalieva@mail.ru

Аннотация. Методом палеотемпературного моделирования выполнена оценка влияния толщи неоплейстоценовых вечномерзлых пород на геотермический режим баженовских отложений. Установлено, что необходим учет мерзлоты мощностью порядка 300 метров для адекватного восстановления термической истории нефтематеринских отложений на землях юго-востока Западной Сибири. Это позволит корректно учесть историю главной фазы нефтеобразования и не занижать (до 25%) расчетные ресурсы УВ.

MODELLING OF THE GEOTHERMAL MODE OF PETROMATERNAL DEPOSITS TAKING INTO ACCOUNT THE NEOPLEISTOCENE GLACIATION.

A.A. Iskorkina[1], A.K. Isagalieva[2], V.I. Isaev[1]

[1]National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, iskorkina.a@mail.ru, isaevvi@tpu.ru

[2]The Kazakh national technical university of K.I. Satpayev, Almaty, a_isagalieva@mail.ru

Annotation. The method of paleotemperature modeling executed a thickness influence assessment the neopleistocene of permafrost breeds on the geothermal mode the Bazhenov of deposits. It's established that the accounting of permafrost with a power about 300 meters for adequate recovery of thermal history of generative potential on lands of the southeast of Western Siberia is necessary. This will properly take into account the history of main oil formation stage and not to lower (to 25%) hydrocarbon resources estimated.

Введение. В работе [1] исследовалась возможность образования многолетнемерзлых пород в позднечетвертичное время (табл.1). А.А. Шарбатяном при моделировании на гидроинтеграторе для района 61º с.ш. на расчетный промежуток 245 тыс. лет назад в качестве верхних граничных условий задачи был взят вековой ход температур на поверхности грунта. Вековой ход температур поверхности грунта определен по кривой векового хода солнечной радиации (по М. Миланковичу) с учетом географических особенностей района.

Таблица 1 – Изменение во времени мощности многолетнемерзлых пород [1]

Время, тыс. лет назад	Глубина положения нижней кромки мерзлоты, м	Вековой ход температур, ^{0}C
245	0	0
235	-350	-10,0
210	-450	-5,5
190	-550	-8,5
165	-450	-4,5
145	-400	-3,5
130	-350	-1,0
110	-300	-3,9
95	-300	-0,7
70	-250	-4,0
50	-250	-1,0
30	-200	-4,3
5	0	+2,5

По новейшим данным [2] вечная мерзлота присутствовала не только в центральной части и на юге Западной Сибири, четвертичное оледенение заходило в пределы северной и северо-

восточной части Казахстана, следы покровного оледенения отмечаются и в центральном Казахстане.

Ранее исследовалось влияние палеоклимата ***(векового хода температур на поверхности Земли)*** на термическую историю и реализацию нефтегенерационного потенциала баженовских отложений на юго-востоке Западной Сибири [3]. Особый интерес вызывают исследования для Западной Сибири при включении в модель палеотемпературных реконструкций не только вековой ход температур на земной поверхности, но и, толщу мерзлоты как своеобразный литолого-стратиграфический комплекс. ***Цель настоящих исследований – оценить влияние неоплейстоценовой толщи мерзлоты*** на геотермический режим баженовских отложений юго-востока Западной Сибири, на примере Томской области.

Методика исследований. Моделирование палеогеотемпературных условий для баженовских отложений выполнено для осадочного разреза глубокой скважины 183 Лугинецкого месторождения. На месторождении залежи УВ связаны в основном с верхнеюрскими коллекторами (горизонт $Ю_1$). Основным источником формирования залежей углеводородов в ловушках горизонта $Ю_1$ (J_3vs) являются потенциально нефтематеринские отложения баженовской свиты *(J_3bg).*

Восстановление термической истории отложений баженовской свиты выполнено на основе палеотектонических и палеотемпературных реконструкций. В настоящей работе применен метод палеотемпературного моделирования [4].

Таблица 2 – Параметрическое описание седиментационной истории и теплофизических свойств осадочной толщи, вскрытой скважиной Лугинецкая 183 (мощность неоплейстоценовой мерзлоты 300 метров)

Свита, толща* (стратиграфия)	Мощность, м	Возраст, млн лет назад	Время накопления, млн лет	Плотность, г/см^3	Теплопроводность, Вт/м·град	Температуропроводность, м^2/с	Тепловыделение, Вт/м^3
Четвертичные *Q*	-	0,052–0	0,052	2,10	1,3	7e-007	1,22e-006
Четвертичные *Q*	300	0,055–0,052	0,003	2,10	1,3	7e-007	1,22e-006
Четвертичные *Q*	-300	0,0565–0,055	0,0015	2,10	2,09	1.05e-006	1,22e-006
Четвертичные *Q*	-	0,2355–0,0565	0,179	2,10	2,09	1.05e-006	1,22e-006
Четвертичные *Q*	300	0,2385–0,2355	0,003	2,10	2,09	1.05e-006	1,22e-006
Четвертичные *Q*	-300	0,24–0, 2385	0,0015	2,10	1,3	7e-007	1,22e-006
Четвертичные *Q*	25	1,64-0,24	1,4	2,02	1,27	6,5e-007	1,1e-006
Плиоценовые N_2	-	1,64–4,71	3,07	-	-	-	-
Миоценовые N_1	-	4,71–24,0	19,29	-	-	-	-
Некрасовская *nk* Pg_3	84	24,0–32,2	8,3	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Чеганская+Люлинворская+Талицкая *hg ll tl* Pg_{3-1}	173	32,2-61,7	29,4	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Славгородская+Ипатовская+Кузнецовская *sl ip kz* K_2	364	73,2-91,6	29,9	2,15	1,4	7e-007	1,25e-006
Покурская *pk* K_{1-2}	803	91,6–114,1	22,5	2,26	1,49	8e-007	1,25e-006
Алымская $a_{1,2}K_{1-2}$	-	114,1-120,2	6,1	-	-	-	-
Киялинская *kls* K_1	550	120,2–132,4	12,2	2,39	1,6	8e-007	1,25e-006
Тарская *tr* K_1	74	132,4–136,1	3,7	2,44	1,62	8e-007	1,25e-006
Куломзинская *klm*K_1	237	136,1–145,8	9,7	2,44	1,64	8e-007	1,25e-006
Баженовская *bg* J_3	**16**	**145,8–151,21**	**5,4**	**2,42**	**1,62**	**8e-007**	**1,3e-006**
Георгиевская *gr* J_3	-	151,2–156,6	5,4	-	-	-	-
Васюганская *vs* J_{3-2}	55	156,6–172	11,7	2,42	1,6	8e-007	1,3e-006
Тюменская *tm* J_2	115	172…	3,7	2,46	1,64	8e-007	1,3e-006

Примечание. Серой заливкой показаны времена «мгновенного» формирования и «мгновенной» деградации толщи неоплейстоценовой мерзлоты. Темной заливкой показано время существования толщи мерзлоты.

Оценка влияния неоплейстоценовой толщи мерзлоты на геотермический режим и степень реализации генерационного потенциала баженовских отложений выполняется на основе

анализа вариабельности результатов следующих четырех вариантов палеотемпературных реконструкций. Вариант 1 – учет векового хода температур на поверхности Земли, *учет неоплейстоценовой мерзлоты мощностью до 300 м*. Вариант 2 – учет векового хода температур, без учета мерзлоты. Вариант 3 – без учета векового хода температур, без учета мерзлоты. Вариант 4 – учет векового хода температур, *учет неоплейстоценовой мерзлоты с гипотетической мощностью до 1000 м*.

В варианте 1 (табл. 2) приняли мощность толщи мерзлоты 300 метров. Формализованный учет толщи мерзлоты осуществляется, начиная с 240 тыс. лет назад, «мгновенной» (по меркам геологического времени, за 1,5+3,0 тыс. лет) заменой «нормальных» осадочных отложений толщей мерзлых пород со своими теплофизическими характеристиками – теплопроводность, температуропроводность [5]. Затем, эта толща мерзлых пород перекрывает осадочный чехол в течение 179 тыс. лет. Далее, «мгновенно» (1,5+3,0 тыс. лет) толща вечной мерзлоты заменяется «нормальными» осадочными отложениями. И, далее существует «нормальный» осадочных чехол до настоящего времени, в последние 52 тыс. лет.

В варианте 4 взяли мощность мерзлоты в 1000 метров, и все выполнялось аналогично первому варианту. Формализованный учет толщи мерзлоты осуществляется также как и для предыдущего варианта, начиная с 240 тыс. лет назад. Замена «нормальных» осадочных отложений толщей мерзлоты осуществлялась по геологическому времени за 5,0 + 3,0 тыс. лет. После этого, толща мерзлых пород перекрывает осадочный чехол в течение 206 тыс. лет, затем, вечная мерзлота заменяется (за 5,0+3,0 тыс. лет) «нормальными» осадочными отложениями. И, далее существует современный разрез 21 тыс. лет.

Результаты и их анализ. Анализ расчетных значений плотности теплового потока *q* из основания осадочного разреза (табл. 3) показывает следующее. *В вариантах 1, 3 и 4* тепловой поток увеличивается на 1,4–2,6–7,1 мВт/м^2 (на 3–5–14%) по отношению к расчетному значению теплового потока *варианта 2* – 52.2 мВт/м^2. *В вариантах 1 и 4* увеличение расчетной плотности теплового потока *q* обусловлено увеличением рассеивания тепла через дневную поверхность за счет высокой теплопроводности и температуропроводности в мерзлой толщи, присутствующей в модели. В этом случае через дневную поверхность рассеивается больше тепла, что требует большего значения плотности теплового потока из основания осадочного разреза. А это, в свою очередь, увеличивает геотемпературы материнских отложений и, следовательно, и объемы генерированных ресурсов УВ.

В случае неучета векового хода температур на дневной поверхности *(вариант 3)*, расчетный тепловой поток также увеличен – 54,8 мВт/м^2. Это объясняется фактическим отсутствием в этом варианте солярного источника тепла в модели палеотемпературных реконструкций.

Сопоставление расчетных и измеренных геотемператур в скважине приведено в табл. 4. Так как измеренные температуры (включая определенные по ОСВ) и расчетные геотемпературы имеют погрешность порядка ±2ºС, то *варианты 3 и 4* решений нельзя признать приемлемыми. В этих вариантах «невязки» превышают оптимальную более чем в 4 раза, а разница с ОСВ (с «максимальным палеотермометром») достигает 11–12ºС. Таким образом, неучет палеоклимата (*вариант 3*) не позволяет построить достаточно строгую физико-математическую модель геотермического режима нефтематеринской баженовской свиты. Так же и гипотетическое предположение о мощности неоплейстоценовой мерзлоты в 1000 м на широтах 57–61º не подтверждается палеотемпературным моделированием.

Расчет плотности генерированных баженовских нефтей *R* [4] (табл. 5) дает максимальное значение для *приемлемого варианта 1* (68 усл. ед.). В этом варианте, помимо учета векового хода температур на дневной поверхности, учтено присутствие неоплейстоценовой мерзлоты мощностью 300 м.

Таблица 3 – Расчетные геотемпературы баженовской свиты в разрезе скважины Лугинецкая 183 (Томская область)

Время, млн. лет назад	Вековой ход температур на поверхности Земли	Глубина положения баженовской	Геотемпературы свиты, ºС			
			Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4

	(«местный [3]),ºС	свиты, м				
0	0	2321	80	81	87	75
0.001	+1	2321	80	81	87	75
0.003	+2	2321	80	81	87	75
0.005	+3	2321	80	81	87	75
0.018	+1	2320	80	81	88	77
0.03	–2	2321	79	81	88	78
0.05	–1	2320	79	81	88	78
0.052	–1	2320	79	81	88	78
0.055	–1	2321	79	81	88	78
0.0565	–2	2320	79	81	88	78
0.07	–4	2319	79	80	88	78
0.09	–1	2319	79	80	87	78
0.11	–4	2319	79	80	87	78
0.13	–1	2319	79	80	87	78
0.15	–4	2318	80	80	87	78
0.19	–9	2318	83	81	87	79
0.21	–6	2317	84	82	87	82
0.222	–7	2317	85	82	87	82
0.225	–8	2317	86	82	87	86
0.235	–10	2317	86	82	87	91
0.2355	–9	2317	86	82	87	94
0.2385	–2	2317	86	83	87	94
0.24	0	2317	86	83	87	95
1.4	+1	2299	86	83	86	94
1.64	+1	2296	86	83	86	95
3.1	+2	2295	88	85	86	96
3.2	+2	2295	89	89	86	97
3.8	+12	2295	95	93	86	104
4.7	+3	2295	88	85	86	96
5.2	–3	2294	89	86	86	97
5.7	+7	2294	92	89	86	101
6.3	+10	2294	94	90	86	102
7	+4	2294	89	86	86	97
20	+15	2294	100	97	86	108
24	+16	2294	101	98	86	110
31,5	+17	2218	98	95	83	107
32,3	+16	2210	97	94	82	105
34	+15	2200	96	93	82	103
37,6	+14	2178	94	91	80	101
41,7	+12	2154	90	87	80	98
42	+11	2158	89	87	80	97
46	+8	2129	86	83	79	93
54,8	+19	2077	95	92	77	102
58	+24	2058	99	96	76	106
61,7	+22	2037	95	92	74	102
73	+15	1899	83	81	69	90
73,2	+16	1897	83	81	68	90
86,5	+22	1735	83	81	62	90
89,8	+22	1694	82	80	61	88
90	+23	1692	82	81	61	88
91,6	+22	1673	79	77	58	85
114,1	+21	870	50	49	29	53
118	+19	869	48	47	29	51
120,2	+19	869	47	47	29	51
132,4	+19	319	29	29	11	30
136,1	+19	245	14	27	8	18
Расчетный тепловой поток из основания, мВт/м2			53.6	52.2	54.8	59.3

Примечание. Заливкой показаны температуры главной зоны нефтеобразования (ГЗН), темной заливкой – абсолютный палеотемпературный максимум ГЗН, серой заливкой – относительные палеотемпературные максимумы ГЗН. Пороговая геотемпература ГЗН – 85 ˚С.

Таблица 4 – Сопоставление измеренных и расчетных геотемператур в скв. Лугинецкая 183

Глубина, м	Измеренные («наблюденные») температуры, ˚С	Способ измерения	Вариант 1, ˚С		Вариант 2, ˚С		Вариант 3, ˚С		Вариант 4, ˚С	
			Расчетные	Разница	Расчетные	Разница	Расчетные	Разница	Расчетные	Разница

			температуры		температуры		температуры		температуры	
2200	77	Пластовые	76	–1	78	+1	83	+6	70	–7
2350	84	Пластовые	81	–3	82	–2	89	+5	76	–8
2345	98	По ОСВ	101	+3	99	+1	87	–11	110	+12
Среднеквадратическое отклонение («невязка»), ºС			±2		±1		±8		±9	

Примечание. Вариант 1 – учет векового хода температур, учет вечной мерзлоты 300 м. Вариант 2 – учет векового хода температур, без учета вечной мерзлоты. Вариант 3 – без учета векового хода температур, без учета вечной мерзлоты. Вариант 4 – учет векового хода температур, учет вечной мерзлоты 1000 м.

Таблица 5 – Оценка плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей (*R*) для вариантов учета векового хода температур и толщи мерзлоты (скважина Лугинецкая 183)

Вариант палеотемпературного моделирования	Расчетные ресурсы (*R*), усл. ед.	Количество расчетных временных интервалов (*n*)	Период работы палеоочага генерации нефти, млн. лет назад	Время работы палеоочага, млн. лет	Максимальные геотемпературы палеоочага, ^{o}C
Вариант 1	68	24	61,7–0,222	61,5	101
Вариант 2	55	19	61,7–54,8; 42–3,1	45,8	98
Вариант 3	27	29	24–0	24,0	87
Вариант 4	109	23	91,6–0,21	91,4	110

Примечание. Заливкой обозначены варианты, приемлемые и равноценные по оптимальной согласованности расчетных геотемператур как с измеренными пластовыми температурами, так и с геотемпературами, определенными по ОСВ.

Выводы: 1) на примере мезозойского-кайнозойского разреза юго-востока Западной Сибири (широты Томской области) установлено, что неучет векового хода температур на поверхности Земли и толщи неоплейстоценовой мерзлоты не позволяет адекватно восстановить термическую историю материнских баженовских отложений; 2) при определении ресурсов УВ обьемно-генетическим методом предпочтительно применять «местный» вековой ход температур на земной поверхности и толщу мерзлоты мощностью 300 метров, что позволит более корректно учесть историю главной фазы нефтеобразования и не завышать/занижать (до 25 %) расчетные ресурсы УВ.

Литература

1. Шарбатян А.А. Экстремальные оценки в геотермии и геокриологии. – М.: Наука, 1974. – 123 с.
2. Эльгер Ю.С. К вопросу о границах покровного четвертичного оледенения в пределах Западной Сибири и Казахстана // Разведка и охрана недр. 2015. № 1. С. 30- 33.
3. Искоркина А.А., Исагалиева А.К., Стоцкий В.В. Оценка влияния палеоклимата на геотермический режим материнских отложений и нефтегазоносность верхнеюрского НГК южной палеклиматической зоны Западной Сибири // 16-я уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2015. – С. 162-167.
4. Исаев В.И. Мезозойско-кайнозойский климат Западной Сибири и геотермический режим нефтематеринских отложений. Обзор проблемы и постановка задачи. // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Седьмые научные чтения Ю.П. Булашевича. Материалы конференции. – Екатеринбург: УрО РАН, 2013. – С. 139-141.
5. Иванов Н.С., Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства мерзлых горных пород. – М.: Наука, 1965. – 74 с.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИМЕТРИИ В РАМКАХ СТАТИСТИЧЕСКОГО И ДЕТЕРМИНИСТСКОГО ПОДХОДОВ

Т.Н. Кишман-Лаванова, *kltam@ukr.net*
Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

Ключевая идея работы – рассматривать инверсию гравиметрических данных в условиях неопределенности априорной информации, используя возможности детерминистического и вероятностного подходов. В рамках вероятностного подхода априорное распределение модельных параметров описывается посредством нечетких множеств. Одноцелевая геофизическая задача с неопределенной априорной информацией преобразуется в многокритериальную задачу оптимизации. Одним из критериев выступает функция принадлежности нечеткого множества возможных решений.

Детерминистический подход используется для вычисления поля от заданного распределения модельных параметров, а также для формализации априорной информации.. Решением задачи есть множество Парето-оптимальных решений, которое конструируется в параметрическом пространстве с помощью трех этапного алгоритма поиска.

Преимущество предложенного метода в том, что он обеспечивает возможность включения широкого интервала невероятностной априорной информации в процедуру инверсии и может быть применен к решению сильно нелинейных задач. Это позволяет уменьшить количество прямых вычислений задачи путем выборочного моделирования пробных точек в параметрическом пространстве.

THE SOLUTION OF THE INVERSE PROBLEM OF GRAVIMETRY WITHIN THE STATISTICAL AND DETERMINISTIC APPROACHES

T.N.Kishman-Lavanova, *kltam@ukr.net*
the Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

The key idea is to consider the inversion of gravity data in terms of uncertainty of a priori information, using deterministic and probabilistic approaches. In the framework of the probabilistic approach the a priori distribution of the model parameters described by fuzzy sets. Special-purpose geophysical problem with uncertain a priori information is transformed into a multiobjective optimization problem. One of the criteria serves the membership function of a fuzzy set of possible solutions.

A deterministic approach is used to calculate the field from a given spatial distribution of model parameters, as well as to formalize a priori information. Solution to the problem there are set of Pareto-optimal solutions, which is constructed in the parametric space using a three-step search algorithm.

The advantage of the proposed method is that it provides the possibility of including the wide range of non-probabilistic a priori information in the inversion procedure and can be applied to the solution of highly nonlinear problems. This reduces the number of direct computing problems by selectively modeling of sample points in the parametric space.

Введение.

Состоятельность метода решения обратной задачи определяется его способностью использовать как детерминистские, так и статистические подходы для получения новых данных на основании имеющейся информации. Поскольку часто исходные данные и априорная информация в задаче характеризуются неопределенностью как вероятностной так и невероятностной природы, то разработка метода, реализующего достоинства каждого подхода, будет актуальным и полезным дополнением в теории интерпретации потенциальных полей.

В геофизических обратных задачах имеют дело с двумя типами неопределенности: неопределенность наблюденных данных – вероятностная, это результат случайных ошибок

наблюдения. Неопределенность априорной информации о параметрах модели часто имеет невероятностную природу, то есть, связана с недоскональными знаниями об исследуемом объекте. Она должна быть описана формально с использованием невероятностной меры неопределенности.

Опыт успешного применения невероятностных методов описания неопределенности достаточно известен для инверсии сейсмических данных [1-4]. Для задач гравиметрии в рамках концепции совмещения детерминистских и вероятностных методов известна работа [5], где решается линейная обратная задача гравиметрии и магнитометрии.

В представленной работе покажем, как неопределенность априорной информации описывается посредством нечетких множеств, и как невероятностные методы, манипулирующие неопределенной информацией, могут быть адаптированы для решения обратной нелинейной задачи гравиметрии. Также сформулируем постановку задачи, преобразуем одноцелевую геофизическую задачу с неопределенной априорной информацией в многоцелевую задачу оптимизации, приведем алгоритм, используемый для нахождения множеств Парето-оптимальных решений.

Описание неопределенной априорной информации.

Невероятностные меры описания неопределенностей были значительно развиты в 1970-х годах. В частности, некоторые теории, которые обобщают или дополняют теорию вероятностей, были введены на протяжении этого десятилетия.

Все теории неопределенности подобны классической теории вероятности в том смысле, что они описывают некоторый тип неопределенности и используют интервал [0, 1] для ее измерения. Более детальный формальный анализ вероятностей, возможностей, нечетких множеств и других мер неопределенности можно найти, например, в монографиях [6, 7].

Использование невероятностных мер для описания неопределенности может обеспечить удобный способ представления априори информации в ГОЗ и построения эффективного компьютерного алгоритма инверсии геофизических данных. Поэтому целесообразно остановиться на теории возможностей, основанной на определении нечеткого множества в силу ее относительной вычислительной простоты по сравнению с теорией вероятности.

Теория нечетких множеств сейчас хорошо развитая область математики. Ее описание можно найти, например, в работах [7, 8, 9]. Приведем только определение нечеткого множества:

Пусть U — так называемое универсальное множество, из элементов которого образованы все остальные множества, рассматриваемые в данном классе задач. Нечетким множеством A называется совокупность пар:

$$A = \left\{ \left\langle x, \mu_A(x) \right\rangle | x \in U \right\},$$

где μ_A — функция принадлежности, т.е. $\mu_A : U \to [0,1]$. Функция принадлежности есть аналогом характеристической бинарной функции в обычных множествах.

Преимущество описания неопределенной информации невероятностной природы посредством нечетких множеств в том, что обеспечивается возможность включения широкого диапазона априорной информации в процедуру инверсии нелинейных задач [1].

Постановка задачи.

Сформулируем постановку задачи, основанную на использовании нечетких множеств.

Пусть под земной поверхностью имеем некоторую область *D*, массы которой характеризуются неоднородным распределением плотности. Геологический объект, принадлежащий этой области параметризуется, то есть, описывается совокупностью параметров $\mathbf{m} = [m_1, m_2, ..., m_k] \in M$, где M – параметрическое пространство. Каждая модель

m рассматривается как точка в модельном пространстве *M*. Плотность вероятности априорного распределения моделей в этом пространстве обозначим $p(\mathbf{m})$.

В *n* точках земной поверхности наблюденное поле силы тяжести имеет значения $\Delta g_н = (g_1, g_2, ..., g_n)$. Априорная информация о геологическом объекте получена из некоторых экспериментальных наблюдений. Вероятностный подход к обратной задаче описывает априорную информацию о модели с помощью функции плотности вероятности $p(\mathbf{m})$. Задача заключается в поиске апостериори плотности вероятности $p(\mathbf{d})$ распределения вектора **m,** исходя из наблюденных данных, теоретической взаимосвязи между модельными параметрами и наблюденным полем, а также априорной информации[10]:

$$p(\mathbf{d}) = k\ p(\mathbf{m})\, L(\mathbf{m}), \qquad (1)$$

где *k* –соответствующая нормализующая константа, $p(\mathbf{m})$ – плотность вероятности априорного модельного распределения, $L(\mathbf{m})$ – функционал, который сравнивает соответствие между наблюденными и теоретическими данными.

На практике в большинстве геофизических экспериментов считается, что обе и априорная и апостериорная плотности распределения есть Гауссовыми. При таких допущениях минимизации подлежит следующая целевая функция:

$$L(\mathbf{m}) = \left[g(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{obs}\right]^T C_D^{-1}\left[g(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{obs}\right] + (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)^T C_M^{-1}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0) \qquad (2)$$

Поскольку модельное пространство обычно многомерное, то и соответствующее априорное распределение, как правило, достаточно сложно. Если известно явное выражение плотности вероятности $p(\mathbf{m})$, то оно может быть использовано в аналитическом решении, хотя это не всегда необходимо. Например, при использовании методов Монте Карло достаточно только иметь набор вероятностных правил, которые позволяют генерировать образцы моделей, распределенные согласно функции плотности вероятности $p(\mathbf{m})$ в модельном пространстве [11].

Если статистические оценки априорной информации невозможны, тогда невероятностная априорная информация может быть описана способом более эффективным, чем с помощью функции плотности распределения PDF, а именно посредством нечетких множеств. Важное преимущество в том, что основные операции нечетких множеств обеспечивают достаточно удобное комбинирование различных четких и нечетких ограничений на модельные параметры. Однако необходимо помнить, что функция принадлежности не может быть использована вместо априори PDF в классической формулировке обратной задачи, так как они не только выражают два разных типа неопределенной информации, но также соответствуют разным мерам неопределенности, которые должны удовлетворять разным аксиомам. Чтобы комбинировать разные типы неопределенности в одной схеме инверсии, необходимо изменить формулировку обратной задачи.

Преобразование традиционной одноцелевой геофизической обратной задачи в многоцелевую задачу оптимизации.

Пусть X – нечеткое множество возможных решений определенное в параметрическом пространстве с функцией принадлежности $\mu_M(\mathbf{m})$ и пусть $p(\mathbf{d}_{obs}|\mathbf{m})$ – условная функция плотности вероятности экспериментальных данных (то есть, вероятность получения определенных экспериментальных данных для значений модельных параметров).

Тогда решение обратной задачи должно:

– максимизировать функцию принадлежности нечеткого множества возможных решений $\mu_M(\mathbf{m})$

– максимизировать плотность условной вероятности PDF наблюденных данных $p(\mathbf{d}_{obs}|\mathbf{m})$.

Такая оптимизационная задача это задача многоцелевой оптимизации с двумя целевыми функциями, то есть

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}) = (F_1(\mathbf{m}), F_2(\mathbf{m})), \quad (3)$$

где $F_1(\mathbf{m}) = p(\mathbf{d}_{obs}|\mathbf{m})$, $F_2(\mathbf{m}) = \mu_M(\mathbf{m})$.

Важно отметить, что в случае одно целевой оптимизационной задачи качество решения оценивается функцией невязки для каждого решения в параметрическом пространстве. В случае многоцелевой задачи каждое решение имеет $L \geq 2$ оценочных значений, одно для каждой целевой функции. Решения с многоцелевыми значениями позволяет сравнить концепция не доминирования.

Решение ***x*** доминирует решение ***y***, если

1. ***x*** не меньше чем ***y*** по всем компонентам, то есть, $f_j(x) \geq f_j(y)$ для всех $j = 1,2,...,L$.

2. ***x*** строго больше ***y***, по крайней мере, для одной компоненты, то есть, $f_j(x) > f_j(y)$ по крайней мере для одного $j = 1,3,...,L$.

Решение есть Парето-оптимальным, если оно не доминируется в целевом пространстве ни одним другим решением, то есть, $x^* \in R^k$ есть Парето-оптимальным или недоминантным решением многоцелевой обратной задачи с вектором целевой функции $f(x) = (f_1(x), f_2(x),..., f_L(x))$, тогда и только тогда, если не существует вектор $x \in R^k$, такой что

$f_i(x^*) \leq f_i(x) \quad \forall i \in \{1,2,...,L\}$ и

$f_j(x^*) < f_j(x)$ по крайней мере, для одного $j \in \{1,3,...,L\}$.

Парето-множество обеспечивает компромисс между критериями для недоминантного решения: один критерий улучшается, другой ухудшается.

Качество решения оценивается двумя значениями: условной PDF наблюденных данных, которая показывает, на сколько решение удовлетворяет наблюденным данным, и функцией принадлежности нечеткого множества возможных решений, которая показывает, на сколько модель удовлетворяет априорной информации. Эти значения могут «конфликтовать» друг с другом, поэтому члены Парето множества это компромиссные решения: невозможно уменьшить одну целевую функцию без увеличения другой.

Алгоритм глобальной оптимизации с использованием определения Парето-множества .

Для эффективного поиска в многомерном параметрическом пространстве мы используем подход, предложенный М. Самбриджем [3] в его алгоритме окрестностей, то есть, аппроксимацию параметрического пространства диаграммами Вороного.

Самбридж М. показал, как диаграммы Вороного могут быть использованы в алгоритмах глобальной оптимизации для уменьшения количества вычислений прямой задачи и для увеличения разрешающей способности области исследования. Вычисление прямой задачи заменяется поиском ближайшего элемента диаграммы Вороного. В алгоритме, предлагаемом в статье, используется деление Вороного для определения области поиска Парето-оптимальных точек. Поиск выполняется способом подобным тому, что описан в работе [3], то есть, шаг поиска определяется размером и границами ячейки Вороного вокруг возмущенной точки.

В работе [1] предложен алгоритм глобальной оптимизации, который реализуется в три этапа.

Первый этап – моделирование начальной популяции из нечеткого множества возможных решений.

Второй этап – вычисление начального Парето-оптимального множества, которое требует оценки функции невязки и решения прямой задачи в каждой точке начальной популяции.

Третья стадия – это возмущение точек из полученного Парето-оптимального множества.

Алгоритм работает до тех пор, пока окрестности всех Парето-оптимальных точек будут исследованы и расстояние между новой сгенерированной точкой и ее ближайшей окрестностью станет меньше, чем некоторое пороговое значение. Выбор окончательного решения из множества P, полученного на последней стадии, может быть сделан с использованием анализа компромисса между значениями функции принадлежности нечеткого множества и функции невязки. Возможен также случай, когда конечное Парето-множество содержит только одно решение.

Поскольку создание такого алгоритма задача вполне независимая, то он может быть использован для решения широкого круга нелинейных геофизических обратных задач.

Литература

1. Kozlovskaya E. An algorithm of geophysical data inversion based on non-probalistic presentation of a apriori information and definition of Pareto-optimality / E. Kozlovskaya // Inverse problem.– 2000.– Vol. 16. – P. 839-861.
2. Sambridge M. Genetic algorithms in seismic waveform inversion / M. Sambridge, G.G. Drijkoningen // Geophys. J. Int. – 1992. – Vol.109. – P. 323-342.
3. Sambridge M. Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm – I. Searching a parameter space / M. Sambridge // Geophysical journal international.–1999. –Vol. 138, №2. – P. 479-494.
4. Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation / A. Tarantola – SIAM, 2005. – 342 p.
5. Балк П.И. Смешанные вероятностно-детерминистские методы решения линейных обратных задач гравиметрии и магнитометрии / П.И. Балк, А.С. Долгаль, А.В. Мичурин // Геофизика. – 2011. – №2. – С. 20-29.
6. Klir G.J. Fuzzy sets, uncertainly and information / G.J. Klir, T.A Folger – Prentice-Hall International, 1988. – 368 p.
7. Zimmermann Hans-Jürgen. Fuzzy set theory—and its applications (4th ed.) / H.-J. Zimmermann – Dordrecht: Kluwer, 2001. – 544 p.
8. Алтунин А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях/ Алтунин А.Е., Семухин М.В.– Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.
9. Zadeh L.A. Fuzzy sets as a basis of a theory of possibility / L.A. Zadeh // Fussy Sets Syst. – 1978. – Vol.1. – P. 3-28.
10. Tarantola A. Generalized non linear inverse problem using the least squares criterion / A.Tarantola, B.Valette // Rev. Geophys. Space. – 1982. –Vol. 20. – P. 219-232.
11. Mosegaard K. Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems / K. Mosegaard, A. Tarantola // J.Geoph.Research. – 1995. – Vol. 100 (B7). – P. 12431 – 12447.

УДК.550.504

ИЗУЧЕНИЕ СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ПРОБ ГРАНИТНОГО ОТСЕВА РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ ПО ОТНОШЕНИЮ К РАДОНУ

***И.А. Козлова, А.М. Меньшикова, Предтеченская Е.И., А.К. Юрков**, ikozlova75@mail.ru*
Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург. Россия

Аннотация. Исследуется сорбционная способность по отношению к радону проб гранитного отсева разных фракций Верх-Исетского гранитного массива. Приведены экспериментальные результаты лабораторных исследований изменения объемной активности радона при помещении исследуемых проб в воздушную среду с высоким содержанием радона.

STUDY OF THE SORPTION CAPACITY OF GRANITE SAMPLES DROPOUT DIFFERENT FRACTIONS AGAINST RADON

***I.A. Kozlova, A.M. Menshikova, A.K. Yurkov**, ikozlova75@mail.ru*
Institute of Geophysics UB RAS, Yekaterinburg. Russia

Abstract. Investigated the sorption ability with respect to radon samples of granite screening of various fractions of Verkh-Isetsky granite massif. Experimental results of laboratory researches of change of volumetric activity of radon in the premises of the investigated samples in air with a high content of radon.

Одной из важнейших проблем в изучении поведения радона в геологической среде является выделение свободного газообразного радона из твердой фазой минералов, горных пород и рыхлых образований. Процесс выделения свободного радона из твердой фазы в открытые поры породы или в окружающее пространство, называется эманированием. Основным явлением, вызывающим эманирование, может выступать эффект радиоактивной отдачи. Атомы радия при распаде испускают альфа-частицу (ядро гелия), и превращаются в атомы радона, при этом некоторая часть энергии альфа-распада передается вновь образовавшимся атомам радона (энергия отдачи). За счет энергии отдачи вновь образованные атомы радона вырываются со своих прежних позиций, в том числе, в кристаллической решетке, и движутся в среде. Такие движущиеся атомы называются атомами отдачи. Атомы отдачи постепенно теряют энергию и останавливаются либо в твердой фазе вещества, образуя «связанный» радон, либо в поровом пространстве, становясь «свободным» радоном [1]. Поскольку при механизме отдачи количество перешедших атомов в поровое пространство зависит от площади ее поверхности, то должно наблюдаться увеличение коэффициента эманирования с уменьшением размера фракций. Однако по литературным и по полученным нами экспериментальным данным такая зависимость выполняется не всегда [2,3]. Так например, при дробление породы происходит уменьшение размеров зерен и увеличение удельной поверхности частиц, в следствии чего возрастает эманирование, но только в случае равномерного распределения радия в минерале. Дробление кристаллов, адсорбировавших радий, не приводит к заметному изменению коэффициента эманирования [2]. При проведении экспериментальных исследований, связанных с выбором оптимального размера фракций для приготовления стандартных образцов радона, было получено небольшое увеличение эманирующей способности от фракции 1-2 мм к более крупным [3]. Содержание радия в гранитном порошке было одинаковым для всех фракций. Одним из объяснений такого поведения эманирования может быть гипотеза о том, что суммарная величина общей внутренней поверхности настолько велика, что изменение наружной поверхности изменяет ее незначительно [2]. Кроме того, при размерах микропор и микротрещин, сравнимых с размерами атомов, происходит соударение со стенками, и диффузия замедляется. В конечном счете, эманирование должно зависеть и от площади наружной поверхности. Вероятной причиной отсутствия в экспериментах зависимости

эманирующей способности от величины наружной поверхности, может быть сорбция радона, которая также зависит от площади наружной поверхности. В таком случае дополнительный радон, выделяющийся за счет увеличения поверхности, ею сорбируется, и в целом эманирующая способность образца горной породы не изменяется.

Целью работы было изучить сорбционную способность гранитного порошка разных фракций. Для экспериментальных исследований был выбран гранитный отсев из Шарташского карьера (Верх-Исетский массив) фракций 2-3 мм, 4-6 мм и 6-8 мм. Вес каждой пробы составлял 412 гр (определялся размерами экспериментальной установки). В состав лабораторной установки входили: измерительный прибор - радиометр радона AlphaGUARD , фильтр, насос, герметичная камера (рис.1). Установка позволяет проводить измерения объемной активности радона (ОАР) при циркуляционном режиме движения воздуха по всей схеме.

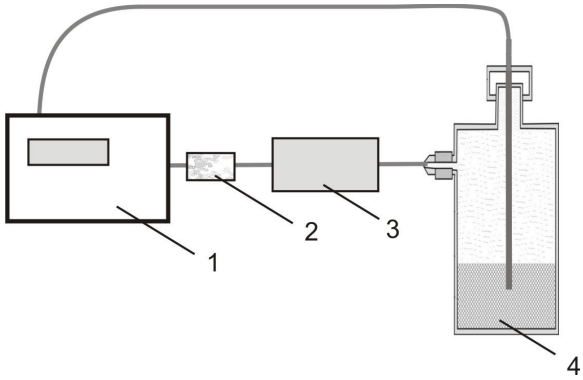


Рисунок 1. Схема лабораторной установки для изучения сорбционной способности проб гранитного отсева разных фракций:
1 – радиометр радона AlphaGUARD, 2 – фильтр, 3 – насос,
4 – герметичная камера с гранитным отсевом

Перед проведением каждой серии измерений, исследуемая фракция гранитного отсева прокаливалась при температуре 160-180^{o}С на открытом воздухе, для удаления остаточной влаги и десорбции ранее сорбированного радона. Далее проба засыпалась в герметичную емкость. Затем запускалась циркуляционная измерительная схема лабораторной установки для определения фоновых значений ОАР. После определения фона, в циркуляционную схему вводилась проба воздуха с высоким содержанием радона, и продолжались измерения. Время каждой серии измерения составляло 24 часа. Полученные результаты приведены на рисунке 2. На графиках отчетливо прослеживается уменьшение объемной активности радона (ОАР) во времени, обусловленное распадом радона и возможной сорбцией гранитным отсевом.

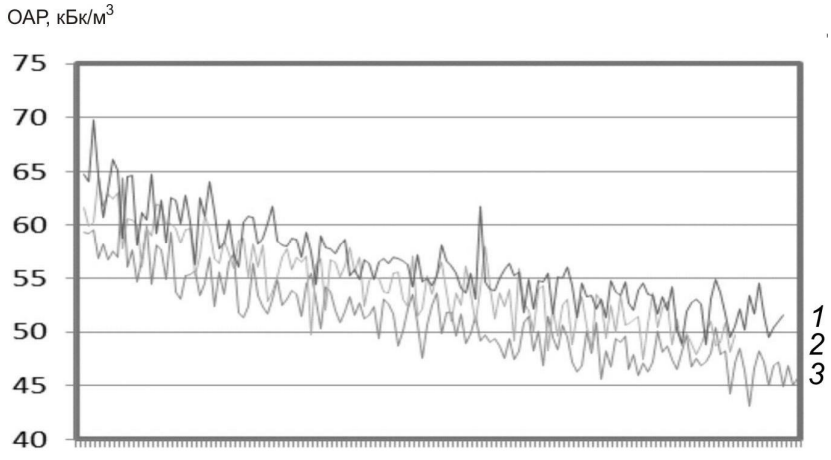


Рисунок 2. Изменение объемной активности радона в герметичной камере с пробами гранитного отсева разных фракций (1 – 6-9 мм, 2 – 4-6мм, 3 – 2-3мм)

Для определения количества сорбированного радона, строилась теоретическая кривая распада радона по начальной объемной активности, определяемой по 5 первым значениям из полученного ряда. И из рассчитанной кривой распада вычитались значения объемной активности радона (ОАР) из полученного ряда. Вычисленная разница составляла количество радона, сорбированного исследуемой пробой данной фракции (рис.3).

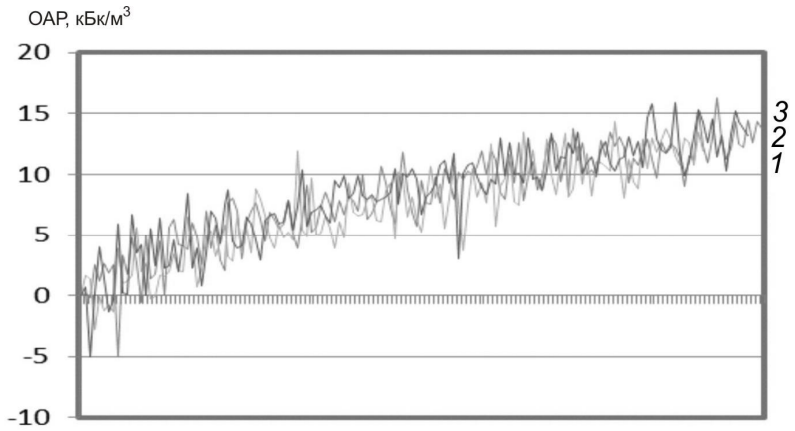


Рисунок 3. Изменение количества сорбционного радона в камере для проб гранитного отсева разных фракций (1 – 6-9 мм, 2 – 4-6мм, 3 – 2-3мм)

Результаты проведенных лабораторных исследований свидетельствуют о том, что радон сорбируется материалом исследуемых образцов. Количество сорбированного радона увеличивается с увеличением времени его контакта с исследуемым образцом, через сутки достигает 20-25% от свободного радона. Но предполагаемой значимой зависимости количества сорбированного радона от площади наружной поверхности исследуемых фракций в данном эксперименте не обнаружено. Причиной отсутствия в проведенных экспериментах зависимости от площади наружной поверхности может быть ее незначительный вклад в общую поверхность, либо процесс сорбции радона представляет собой более сложное физическое явление и не определяется только величиной размера сорбирующей поверхности.

Работа выполнена в рамках проектов 15-18-5-19 и № 15-2-5-32 Программы УрО РАН.

Список литературы:

1. Морозова И.М. Миграция атомов редких газов в минералах /Морозова И.М., Ашкинадзе Г.Ш. // - Л.: Из-во «Наука», - 1971, 20 с.
2. Сердюкова А.С, Капитанов Ю.Т. Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе. М.: Атомиздат, 1969. 312 с.
3. Малыгина Т.М, Козлова И.А. Использование естественных эманирующих сред для калибровки радиометров радона //Уральская научно-практическая конференция по метрологии: Тез. докладов. Екатеринбург, 1998. С. 34.

УДК 551.24

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ И НЕОТЕКТОНИКИ АЭРОКОСМОГЕОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

И.С. Копылов, *georif@yandex.ru*
Естественнонаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета, г.Пермь, Россия

С целью оценки геологической безопасности калийных рудников разработана методика линеаментно-геодинамического анализа на основе дистанционных аэрокосмогеологических исследований в комплексе с геофизическими, структурно-геоморфологическими и другими методами. Методика была отработана на Верхнекамском калийно-магниевом месторождении (Россия, Пермский край) – наиболее хорошо изученном различными геолого-геофизическими методами и применена на Жилянском (Республика Казахстан) и Тюбегатанском (Республика Узбекистан) месторождениях калийных солей. Проведена оценка современной геодинамики и неотектоники. Установлены геодинамические активные зоны, которые представляют наибольшую опасность для ведения горных работ.

Ключевые слова: неотектоника, геодинамические активные зоны, методология оценки и прогнозирования геодинамической опасности, калийные рудники.

ASSESSMENT OF MODERN GEODYNAMICS AND NEOTECTONICS AEROSPACE GEOLOGICAL METHODS ON THE POTASH DEPOSIT

I.S. Kopylov, *georif@yandex.ru*
Natural Science Institute of the Perm State National Research University, Perm, Russia

Methods lineament-geodynamic analysis based on remote aerospace geological research in conjunction with geophysical, structural and geomorphological and other methods designed to assess the safety of geological potash mines. The technique was tested on Verkhnekamskoe potassium and magnesium deposit (Russia, Perm Kraj) – the most well-studied various geological and geophysical methods and applied on Zhiljanskoye (Kazakhstan) and Tubegatangskoye (Uzbekistan) deposits of potash salts. Evaluation of modern geodynamics and neotectonics was conducted. Geodynamic activity zones that pose the greatest danger to the mining have been established.

Keywords: neotectonics, geodynamic active zones, methodology of estimation and forecasting of geodynamic dangerous, potash mines.

Оценка новейшей тектоники современной геодинамики при разработке любых месторождений полезных ископаемых, в т.ч. – калийных солей является важнейшим элементом их геологической безопасности. Большинство аварий на калийных рудниках происходит на границах неотектонических блоков разных уровней, где в условиях повышенной геодинамической активности формируются участки с высокой степенью трещиноватости пород.

Основой методологии оценки и прогнозирования геодинамической опасности районов действующих и проектируемых калийных рудников и выделения геодинамических активных зон (ГАЗ) может быть системный линеаментно-геодинамический анализ на основе дистанционных аэрокосмогеологических исследований (АКГИ) в комплексе с геофизическими, структурно-геоморфологическими, гидрогеологическими, геохимическими методами [1-3]. Критериями оценки геодинамической (неотектонической) активности являются различные расчетные показатели. Одним их важнейших показателей ГАЗ является повышенная плотность тектонических нарушений (линеаментов). Анализ заключается в получении линеаментно-блоковой модели путем дешифрирования космических снимков (КС), ранжировании территории по степени геодинамической активности и построение ее

картографических оценочных моделей. Дешифрирование цифровых КС, обработка данных, геоинформационное картографическое моделирование проводится с применением ГИС-технологий в Arc GIS и ArcView GIS [4].

Методика исследований была отработана на крупнейшем в мире *Верхнекамском калийно-магниевом месторождении* (Россия, Пермский край) – наиболее хорошо изученном различными геолого-геофизическими методами. Оно находится на границе двух геоблоков кристаллической коры [5], имеет сложное геологическое строение и опасные условия для разработки, обусловленные высокой степенью тектонической трещиноватости [6, 7], значительной водообильностью пород и карстом (как правило, эти явления в разной степени присутствуют на всех месторождениях солей). По региональной геодинамической оценке масштаба 1:500 000, было установлено, что территория месторождения находится в пределах ГАЗ регионального уровня площадью более 1000 км^2. По районированию масштаба 1:100 000 в ее пределах выделено более 50 ГАЗ размером от 2 до 15 км [8]. Детальные АКГИ масштаба 1:25 000, при котором применялось дешифрирование цифровых КС, обработка данных с применением ГИС-технологий позволили еще более детализировать геодинамическое строение – были выделены ГАЗ с размерами до 1 км. Некоторые из них имели хорошую пространственную сходимость с зонами разуплотнения по гравиметрии (Санфиров, 2009ф) и с зонами сильной проницаемости по электроразведке (Колесников, 2010ф). По комплексу критериев геодинамической оценки проведено геоинформационное моделирование и составлена карта аномальности геодинамического состояния, данные которой были учтены впоследствии при проектировании горных работ на новых участках.

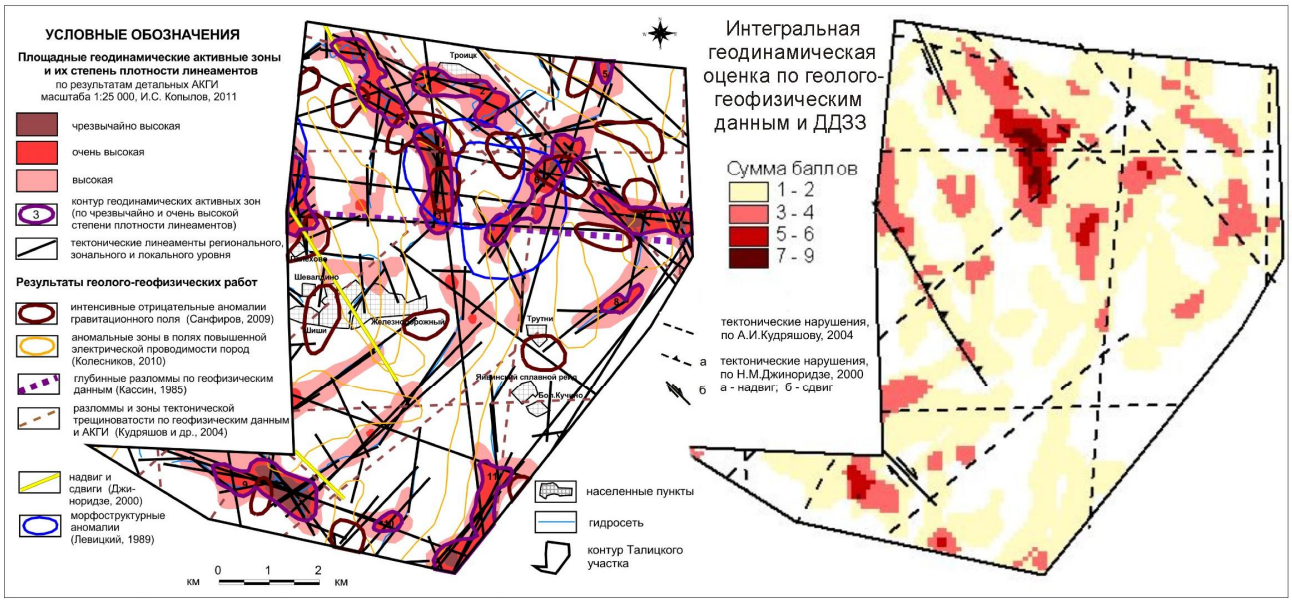


Рис. 1. Геодинамические активные зоны и интегральная геодинамическая оценка Талицкого участка по геолого-геофизическим и аэрокосмогеологическим данным [9]

Данная методика выделения ГАЗ была применена на Жилянском месторождении калийных солей (Казахстан) и Тюбегатанском месторождении калийных солей (Узбекистан). Эти районы ранее аэрокосмическими методами были изучены слабо, поэтому дешифрирование проводилось по нескольким (5-8) уровням генерализации в масштабах от обзорных и региональных 1:10 000 000-1:1 000 000 на больших площадях (сотни тыс. км^2) до детальных работ 1:50 000 и 1:25 000 на площадях горного отвода месторождений.

Жилянское месторождение калийных и полигалитовых солей, расположено в Актюбинской области Республики Казахстан в 10 км к востоку юго-востоку от г. Актобе; представлено залежами полигалита и сильвинита. Характеризуется большой протяженностью, разобщенностью в плане и высотах рудных тел, резкими колебаниями условий залегания, мощностей рудных тел и содержания полезных компонентов. По

геодинамическим условиям район Жилянского месторождения находится в сложных тектонических условиях, находясь на стыке Прикаспийской синеклизы (с запада и непосредственно на площади), Предуральского краевого (с севера) прогиба и Уральской складчатой системы (с востока). Блоково-надвиговое взаимодействие этих крупных тектонических структур осложняется соляно-купольной тектоникой, формируя сложную современную геодинамическую обстановку. Основная геодинамическая активность связана с системой меридионального тектонического нарушения, проходящего через месторождение с юга на север. Его пересекают многочисленные локальные субширотные и диагональные линеаменты, которые в свою очередь «оперяются» короткими линеаментами.

По результатам АКГИ на Жилянском месторождении уточнено его геологическое и неотектоническое строение. Линеаментно-геодинамический анализ и геодинамическое районирование проведены на уровне детальности масштаба 1:50 000 и 1:25 000. В контурах горного отвода месторождения установлено 8 локальных ГАЗ с очень высокой плотностью линеаментов, их размеры составляют в длину 0,7-4,0 км, в ширину 0,3-0,8 км. В их пределах установлены 13 участков (с чрезвычайно высокой плотностью линеаментов), с размерами от 0,1х0,2 до 0,6х1,5 км (рис. 2 – А). Их необходимо учитывать при проектировании, строительстве горно-обогатительного комбината и в дальнейшей разработке месторождения [10].

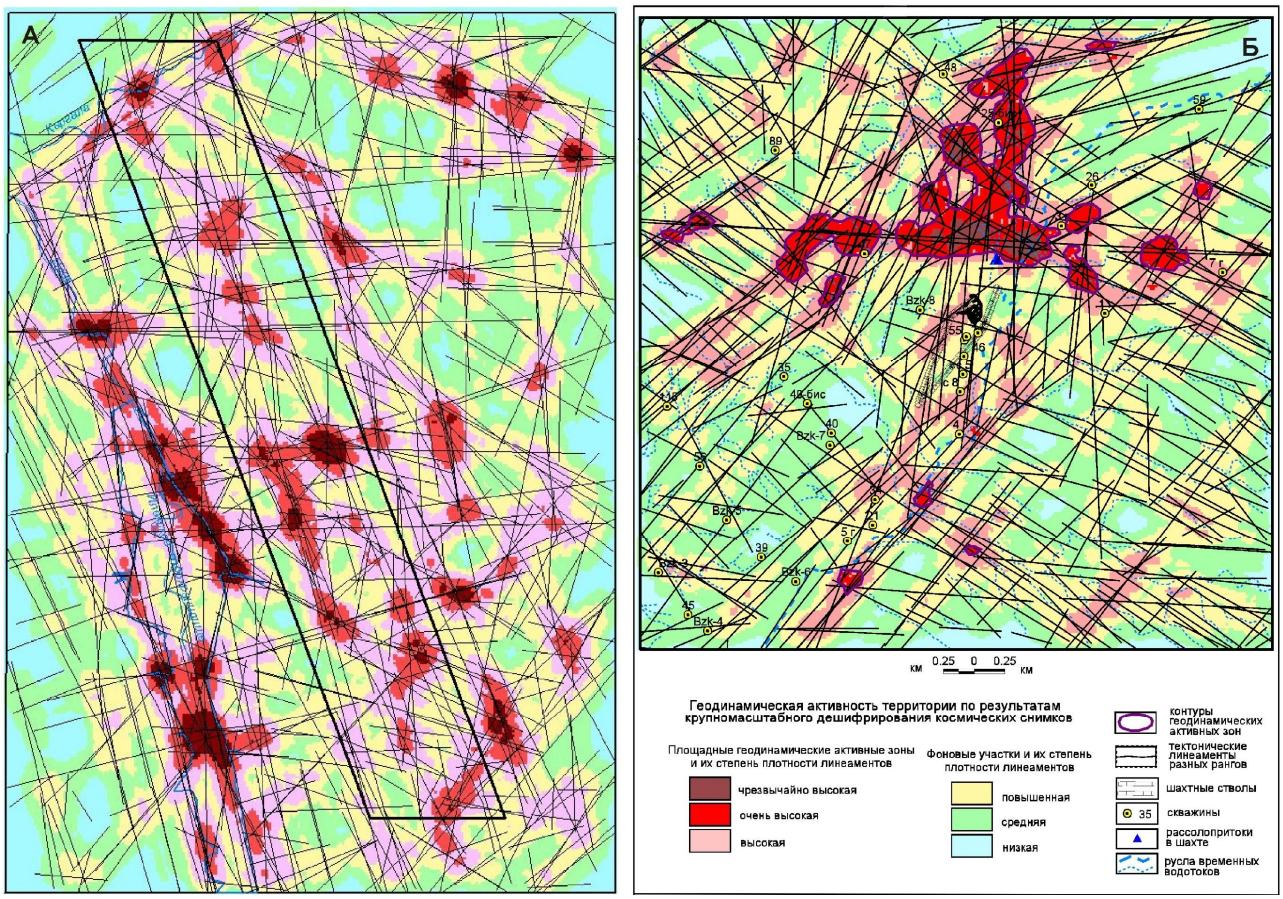


Рис. 2. Фрагменты карт геодинамических активных зон месторождений калийных солей А – Жилянского (Казахстан), Б – Тюбегатанского (Узбекистан)

Тюбегатанское месторождение калийных солей, расположено в Дехканабадском районе Кашкадарьинской области Республики Узбекистан. Протяженность месторождения с юго-запада на северо-восток составляет 24 км при ширине до 7 км (пределах узбекской части соответственно – 14 и 1,5-3 км). В контуре подсчета запасов площадь составляет 69,6 км^2. По геодинамическим условиям район находится в сложных тектонических и сейсмических условиях, находясь на стыке планетарных (Евроазиатская и Индийская плиты) и

субпланетарных (Туранская плита и Тянь-Шанский ороген) тектонических структур. Блоково-надвиговое взаимодействие этих крупных тектонических структур осложняется локальной сдвиговой и соляно-купольной тектоникой. Основная геодинамическая активность связана с системой северо-восточного тектонического нарушения, проходящего через Тюбегатанскую структуру с юга-запада на северо-восток. Его пересекают многочисленные локальные субширотные и диагональные линеаменты, которые в свою очередь «оперяются» короткими линеаментами. Для разрабатываемого месторождения изучение новейшей тектоники и современной геодинамики является особенно важным, поскольку на руднике в конце 2012 г. произошел сильный аварийный приток рассолов в шахтные стволы, который с большим трудом удалось ликвидировать. Необходимо было установить неблагоприятные и более благоприятные участки для проходки шахтных стволов.

Дешифрирование КС проведено по 8 уровням изучения – от обзорного в пределах всего Южного Узбекистана, до крупномасштабного на площади Тюбегатанского месторождения и детального – на участке шахтных полей с анализом новейшей тектоники и современной геодинамики. По результатам региональных АКГИ масштабов 1:1 000 000 – 1:100 000 выявлены крупные линеаментные зоны предполагаемых тектонических нарушений фундамента и осадочного чехла. По крупномасштабному дешифрированию КС масштабов 1:50 000-1:10 000 в районе месторождения и прилегающей территории выделено более 2150 прямолинейных тектонических линеаментов различных рангов с преобладающими СВ и СЗ направлениями, а также дугообразные линеаменты и кольцевые структуры.

Неотектоническое районирование проведено на основе линеаментно-блокового анализа с выделением неотектонических блоковых структур, при этом, в центральной части месторождения выделены 2 мезоблока, 6 локальных блоков первого порядка и 22 локальных блоков второго порядка, характеризующиеся различной степенью неотектонической активности. Линеаментно-геодинамический анализ и геодинамическое районирование выполнены на уровне детальности масштабов 1:50 000, 1:25 000 и 1:10 000. В районе месторождения выделены 10 ГАЗ (рис. 2 – Б). Крупнейшая из них – Тулешская ГАЗ в северной части центрального участка месторождения, изометричной формы площадью 4,3 км^2; при детализации дифференцируется на 11 зон с площадями 0,01-0,06 км^2 [11]. С учетом имеющегося геологического материала на территории шахтного поля рудника выполнен комплексный анализ геологических и аэрокосмогеологических материалов с построением карты комплексного анализа и сделаны методические рекомендации по проведению геолого-геофизических исследований в целях безопасного ведения горных работ и промышленного освоения.

Проведенные детальные дистанционные исследования на действующем руднике показывают на хорошую сходимость результатов различных методов АКГИ и геофизики. Это обеспечивает надежность прогнозирования участков повышенной трещиноватости пород и рассолопроявлений в горных выработках, знания о которых необходимы для принятия оперативных решений по проходке шахтных стволов. На этих участках прогнозируются наиболее активные геодинамические зоны, которые представляют наибольшую опасность для ведения горных работ. На участках шахтных полей они были подтверждены полевыми наблюдениями и данными геофизических исследований. Было рекомендовано исключить эти зоны из разработки месторождения, также были намечены более благоприятные участки для отработки залежи калийных солей.

По результатам аэрокосмогеологических исследований во всех изученных нами регионах установлена высокая пространственная и корреляционная сходимость геодинамических активных зон с геофизическими, геохимическими и гидрогеологическими аномалиями с участками неблагоприятных геологических процессов и явлений и грунтовых условий, увеличение интенсивности опасных природных и техногенных процессов. Подтверждено положение о ведущей роли геодинамических активных зон в формировании

горно-геологических, гидрогеологических, инженерно-геологических и геоэкологических условий.

Список литературы

1. Копылов И.С. Теоретические и прикладные аспекты учения о геодинамических активных зонах // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 4.
2. Копылов И.С. Картирование геодинамических активных зон Среднего Урала при проведении аэрокосмогеологических исследований территории трасс магистральных газопроводов // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Екатеринбург, 2011. С. 196-198.
3. Копылов И.С. Линеаментно-геодинамический анализ Пермского Урала и Приуралья // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6.
4. Копылов И.С. Методы и технологии выявления геодинамических активных зон при разработке калийных месторождений для обоснования безопасного ведения горных работ // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 4. С. 38-43.
5. Мартышко П.С., Дружинин В.С., Начапкин Н.И., Ладовский И.В., Бызов Д.Д., Осипов В.Ю., Цидаев А.Г. Схематическое тектоническое районирование уральского региона на основе разработанных алгоритмов и методики создания объемной геофизической модели верхней части литосферы // Литосфера. 2012. № 4. С. 208-218.
6. Кудряшов А.И., Васюков В.Е., Фон-дер-Флаасс Г.С. и др. Разрывная тектоника Верхнекамского месторождения солей. Пермь: ГИ УрО РАН, 2004. 194 с.: ил. 65.
7. Филатов В.В., Кассин Г.Г. Предпосылки прогнозирования динамических событий на территории Верхнекамского месторождения калийных и калийно-магниевых солей // Рудник будущего. 2011. № 1 (5). С.71-74.
8. Копылов И.С. Геодинамические активные зоны Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей и их влияние на инженерно-геологические условия // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 5.
9. Копылов И.С., Коноплев А.В. Оценка геодинамического состояния Талицкого участка Верхнекамского месторождения калийных солей на основе ГИС-технологий и ДДЗ // Геоинформатика. 2013. № 2. С. 20-23.
10. Копылов И.С., Коноплев А.В., Ибламинов Р.Г. Новейшая тектоника и современная геодинамика Западного Казахстана на Жилянском месторождении калийных солей // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5.
11. Копылов И.С. Оценка геодинамической активности Тюбегатанского месторождения калийных солей (Южный Узбекистан) // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2014. № 14. С. 36-39.

Статья оставлена в рамках мероприятий ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020гг.»

УДК (552.1:53):550.3+550.85

ТЕРМОБАРИЧЕСКОЕ ЛОКАЛЬНОЕ ПОВЫШЕНИЕ ПОРИСТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД В ЗЕМНОЙ КОРЕ ПО ДАННЫМ ПЕТРОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.А. Корчин, *korchin@igph.kiev.ua*
Институт геофизики им.С.И.Субботина НАН Украины, Киев

Аннотация. Интерес к исследованиям порового пространства пород возрастает в связи с изучением миграции газово-жидких фракций в кристаллических горных породах на различных глубинах литосферы. Всю гамму закономерных и случайных причин, влияющих на образование пор и микротрещин, выявить практически невозможно. Однако, выявлена тенденция, что у петрографически сходных групп пород увеличение пористости и микротрещиноватости ведет к уменьшению скорости распространения в них упругих волн. В предлагаемой работе на основании изучения связи порового пространства со скоростью распространения продольных упругих волн при высоких давлениях и температурах в породах осуществлена попытка более полно охарактеризовать изменение пористости и трещиноватости в зависимости от воздействия *P* и *T* различных глубин, объяснить некоторые коровые аномалии разуплотнения пород, которые, в свою очередь, могут являться проводниками миграции и локализации углеводородов глубинного происхождения.

ТЕРМОБАРИЧЕСКОЕ LOCAL INCREASE OF POROSITY OF MOUNTAIN BREEDS IN THE EARTH'S CRUST FROM DATA OF ПЕТРОФИЗИЧЕСКОГО DESIGN

V.A. Korchin, *korchin@igph.kiev.ua*
S. I. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine
32 Palladin Avenue, 03680 Kiev-142, Ukraine

Abstract. Interest to researches of interstitial space considerably grew in connection with the study of migration of gas-liquid fractions, in particular hydrocarbons, in crystalline rocks on the different depths of lithosphere. All of gamut of appropriate and casual reasons, which influence on formation of pores and microfractures, to expose it is practically impossible. However, a tendency is exposed, that at petrographically similar groups of rocks the increase of porosity and microfractures conduces to reduce of elastic waves propagation velocity in them.

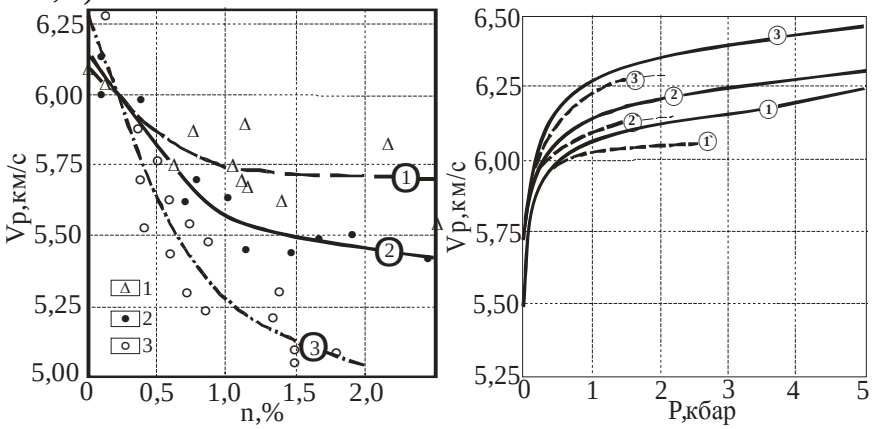
In the offered work on the basis of study of connection of interstitial space with the longitudinal waves propagation velocity at high pressures and temperatures in rock samples an attempt more fully to describe a change porosity and fractures of rocks depending on *P* and *T* influence of different depths is carried out, to explain some crust anomalies of rocks unpacking, which can be conductors of migration and localization of deep origin hydrocarbons.

Физические характеристики различных типов кристаллических (изверженных и метаморфических) пород в значительной степени зависят от их трещиноватости и пористости, состояния межзерновых границ, хотя, в первую очередь, обусловлены составом и структурно-текстурными особенностями минерального субстрата. Наличие в породах различного вида пор и микротрещин определяется условиями их формирования, последующими процессами преобразования [1–3]. Интерес к исследованиям порового пространства в кристаллических породах значительно возрос в связи с изучением миграции газово-жидких фракций, в частности, углеводородов, в них на различных глубинах литосферы [4, 5]. Всю гамму закономерных и случайных причин, влияющих на образование пор и микротрещин, выявить практически невозможно. Однако, определена тенденция, что у петрографически сходных групп пород увеличение пористости и микротрещиноватости ведет к уменьшению скорости распространения в них упругих волн. Изучая скорость в кристаллических породах в различных термодинамических условиях, нами установлена

степень влияния на неё изменения объема и характера нарушения сплошности минеральной среды.

На основании изучения связи порового пространства со скоростью распространения продольных упругих волн при высоких давлениях и температурах в образцах гранитов Украинского щита, осуществлена попытка более полно охарактеризовать изменение пористости и трещиноватости пород в зависимости от воздействия *P* и *T* различных глубин, объяснить некоторые коровые аномалии разуплотнения пород, которые, в свою очередь, могут являться проводниками миграции и локализации углеводородов глубинного происхождения.

Нами выявлена четкая нелинейная зависимость скорости от пористости при атмосферном давлении для трех групп гранитов, отличающихся по величине зерен породообразующих минералов. Градиенты изменения $V_P=f(n)$ возрастают с увеличением размеров зерен (рис. 1, а).



а б

Рис. 1. а – Изменение $V_P=f(n)$ для гранитов: 1 – мелкозернистых, 2 – среднезернистых, 3 – крупнозернистых; б – изменение $V_P=f(P)$ для гранитов: 1 – мелкозернистых, 2 – среднезернистых, 3 – крупнозернистых. Пунктирными линиями и цифрами со штрихами показаны графики изменения скорости лишь за счет закрытия порового пространства под воздействием давления.

Пористость и структурно-текстурные особенности гранитов являются основными факторами, обусловливающими изменение скорости распространения продольных упругих волн при давлениях до 2–3,5 кбар в образцах одинакового минерального состава (рис. 1, б). Градиенты изменения $V_P=f(P)$ более высокие у гранитов с большими размерами зерен породообразующих минералов. Значения скоростей в почти “беспоровых” гранитах хорошо согласуются с экстраполированными линейных участков кривых $V_P=f(P)$ до пересечения с осью ординат. Криволинейные участки графиков $V_P=f(P)$ характеризуют увеличение скорости, главным образом, за счет закрытия различных видов пор и микротрещин, а также в связи с изменением упругих свойств породообразующих минералов.

Получено уравнение $V_P = V_0 + (0{,}6\rho_0 + 0{,}09n_0 - 1{,}5)\lg P$, с достаточной степенью надежности оценивающее скорость продольной упругой волны в образцах гранитов при высоких гидростатических давлениях (до 5000 кг/см^2) по данным значений скорости, плотности и пористости, измеренных в нормальных условиях. Средние значения давлений, при которых практически отсутствует влияние порового пространства на изменение скорости, составляют для мелко-, средне- и крупнозернистых гранитов соответственно 2,6 (2,0÷2,8), 2,2 (1,8÷2,6) и 1,9 (1,8÷2,4) кбар. Графики $\frac{n_0 - n_P}{n_0} = \frac{\Delta n}{n_0} = f(P)$, где $n = n_0\left(1 - \sqrt{\frac{V_P - DP - V_0}{V_{\acute{Y}} - V_0}}\right)$, характеризуют относительное изменение порового пространства (в %) от давления в гранитах (рис. 2). Приведенное соотношение позволяет по данным

измерениям скорости распространения упругих волн в горных породах в условиях высокого давления оценить изменения величины порового пространства пород в зависимости от приложенного давления.

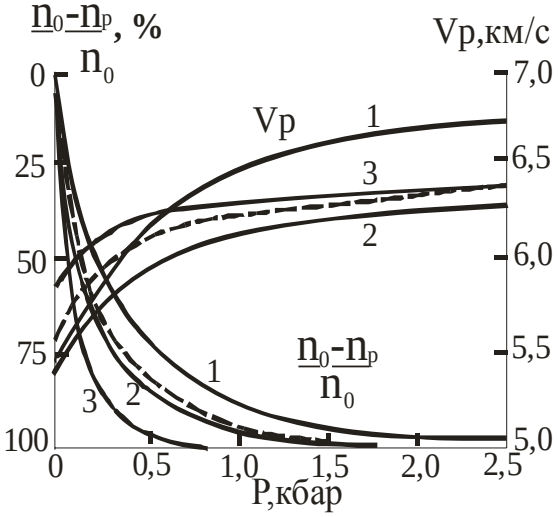


Рис. 2. Относительное изменение порового пространства при увеличении давления в гранитах: 1 – мелкозернистых, 2 – среднезернистых, 3 – крупнозернистых.

Поскольку данное соотношение получено на основании измерений $V_P=f(P)$, то необходимо иметь ввиду, что речь идет здесь только о пористости, влияющей на изменение упругих констант горных пород, измеренных ультразвуковым методом, т.е. пористости, являющейся эквивалентом акустической неоднородности реальных твердых тел. Наибольшие градиенты уменьшения объёма порового пространства при увеличении давления наблюдаются у крупнозернистых гранитов. Наименьшие – у мелкозернистых. Предполагается, что при повышении давления, в первую очередь, закрываются микротрещины и щелевидные поры. Следовательно, у крупнозернистых разностей гранитов возможно преобладание щелевой пористости, а мелкозернистым присуща, в основном, объемная пористость.

Используя вышеизложенные материалы, проанализируем поведение упругих характеристик пород в модельных термобарических условиях различных глубин (рис. 3).

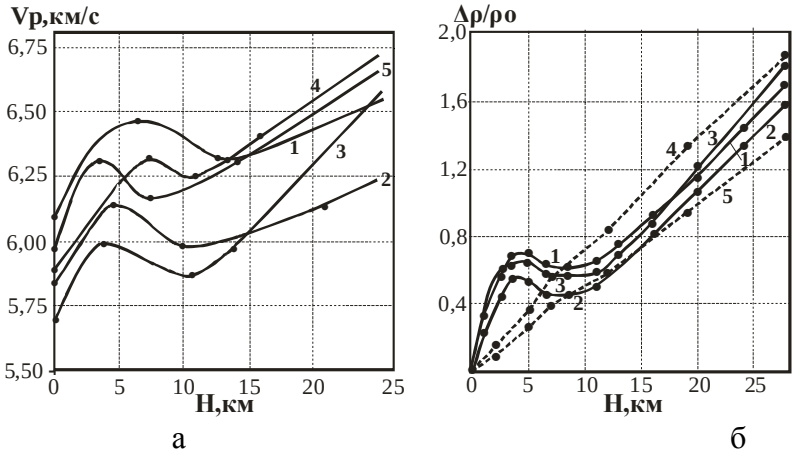


Рис. 3. а – Изменения скорости продольных волн с глубиной в некоторых гранитоидах УЩ: 1 – граниты равномернозернистые, 2 – граниты порфировидные, 3 – новоукраинские граниты, 4 – граниты рапакиви; 5 – плагиограниты. б – относительное изменение плотности с глубиной (по экспериментальным данным) для гранитов (1), метасоматитов (2) и гнейсов (3) центральной части УЩ; пунктирные (4, 5) – гидростатика.

Первый участок увеличения упругих скоростей на зависимостях $V_P, V_S = f(PT) = f(H)$ характеризуется более высокими значениями градиентов изменения $V_{P,S}$ по сравнению с двумя другими. Эти значения несколько выше, чем значения $(\partial V_{P,S}/\partial P)_{0\text{-}1}$, обнаруженные при гидростатическом давлении. Самые высокие величины градиентов изменения упругих скоростей на этом участке присущи гранитоидам с высокой пористостью. Более крупнозернистые породы имеют меньшие градиенты изменения упругих скоростей, что подобно поведению этих пород при воздействии на них высокого гидростатического давления при комнатной температуре. С увеличением основности пород рост значений градиентов скоростей от воздействия давления и температуры уменьшается, что также аналогично данными, полученными при приложении высокого гидростатического давления [4-6].

Были исследованы зависимости градиентов понижения $(\partial V_{P,S}/\partial H)_2$ и увеличения $(\partial V_{P,S}/\partial H)_3$ упругих скоростей от минерального состава в зоне инверсии $V_P = f(PT) = f(H)$. Высокие значения градиентов уменьшения скорости присущи гранитоидам с большим количеством кварца. Для этих пород характерны наибольшие зоны пониженных скоростей. Самые высокие значения градиентов $(\partial V_P/\partial H)_2$ и $(\partial V_P/\partial H)_3$ в ЗНС наблюдаются у крупнозернистых гранитов (порфировидных и рапакиви).

Вещественные и структурные изменения образцов пород, подверженных воздействию программных P и T, соответствующих различным глубинам, дополнительно исследовались оптическими, рентгеноструктурными, электронно-микроскопическими методами [4–6]. Весь комплекс вещественно-структурных изменений пород, испытавших термодинамические воздействия, соответствующие условиям 3–15 км (область инверсии скоростей упругих волн), когда с увеличением PT скорости V_P, V_S уменьшаются, образуя ЗНС, свидетельствуют о свойствах пород, характерных их катакластическому преобразованию с повышением трещиноватости и пористости пород. В этом интервале воздействия P и T происходит разрыхление минеральной среды, в основном, за счет разуплотнения межзерновых границ, явление дилотансии. Основной механизм этого – совместное действие развивающихся в среде неравномернораспределяющихся неоднородных напряжений по объёму образца, иногда достигающих в локальных контактах значений больше предела прочности отдельных минералов, приводящих к хрупким на микроуровне разрушениям среды. Этому разуплотнению способствуют разного значения коэффициенты линейного расширения отдельных разноориентированных минералов, эффект декрипитации газово–жидких включений, миграция свободной воды и газа по микротрещинам породы. Значительно увеличивается двойникование минералов, расширяются межзерновые границы за счет их милонитизации, увеличивается количество магистральных микротрещин.

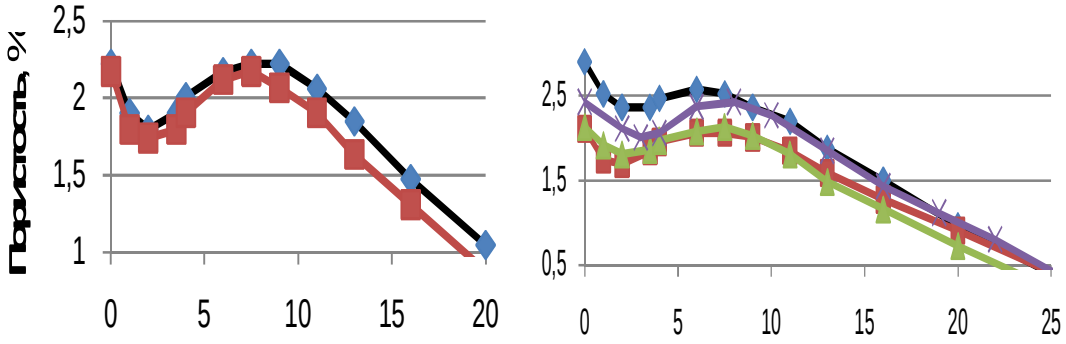
Происходит растрескивание и разрушение газово-жидких включений. Уменьшаются блоки мозаики отдельных зерен минералов. Увеличивается плотность дислокаций в блоках и уменьшается в межзерновых границах. Увеличивается относительная деформация зерен, их двойникование. Увеличиваются дефекты упаковки минералов. Увеличивается число центров генерации дислокаций, которые перемещаются в основном за счет трансляционного скольжения. Совокупность обнаруженных микроструктурных преобразований породы свидетельствует о низкотемпературном упругом упрочнении и хрупком разрушении минерального вещества. Кроме того, в зоне низких скоростей (H=3÷15 км, P=1,5÷3 кбар, T=150÷250°С) уменьшаются упругие константы пород и их плотности (рис. 3, б). Это является следствием увеличения дефектного состояния пород (поры, трещины), межзерновые границы становятся более рыхлыми и увеличиваются в объеме.

По данным уменьшению скорости распространения упругих волн и плотностям в зоне можно предполагать, что здесь пористость пород увеличивается на 10–20% от возможных значений на глубинах 3–5 км (горизонтов максимальных значений упругих характеристик пород выше ЗНС).

Одновременно эти микроструктурные нарушения породы подготавливают условия для существенных её преобразований при дальнейшем увеличении давления и температуры

[6]. С увеличением действующих на образец программных *PT*-параметров (*H*>25 км, *P*>5,5 кбар, *T*>300 °С) наблюдается интенсивное возрастание упругих характеристик породы. После уплотнения породы с глубиной (H>10÷15 км) включаются механизмы, характерные пластическим деформациям среды. За счет вещественных и структурных (на уровне элементарных дефектов) перестроек происходит совершенствование породы, что улучшает её упругие характеристики, возрастают плотность и скорости распространения упругих волн в них, понижается пористость и трещиноватость.

На основании выше изложенного, графическим путем и теоретическими расчетами, показано, что пористость горных пород с глубиной уменьшается на 50–70% до глубины 3–5 км. В зоне низких скоростей (4–15 км) – зоне разуплотнения пород, разрыхления межзерновых границ отмечается увеличение пористости вплоть до исходного состояния пород (рис. 4). Далее, с глубиной наблюдается вторичное снижение пористости горных пород, повышается их плотность.



а б

Рис. 4. Изменение пористости в породах в термодинамических условиях соответствующих глубин: а – гранитоиды, б – основные породы.

Таким образом, в зоне пониженной плотности (ЗНС) возможны более активные процессы массопереноса, газово-жидких флюидов, в том числе, углеводородов глубинного происхождения. Здесь, вероятнее всего, происходит активная миграция и локальное накопление этих сред [4].

Литература

1. Корчин В.А. Моделирование изменения с глубиной пористости горных пород земной коры по данным *PT* петрофизики // Материалы Всероссийской конференции по глубинному генезису нефти «3-и Кудрявцевские чтения». – Москва: ЦГЭ, 2014. – 030. – CD.
2. Корчин В.А. Коровые зоны низких скоростей – перспективные горизонты локализаций глубинных углеводородов // Глубинная нефть ISSN 2306-3114. – 1, № 8. 2013. С. 1099–1116.
3. Корчин В.А. Термодинамика коровых зон низких сейсмических скоростей (новая научная гипотеза). LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 280 с.
4. Корчин В.А., Буртный П.А., Коболев В.П. Термобарическое петрофизическое моделирование в геофизике. Киев: Наукова думка, 2013. 312 с.

УДК 550.384.3

МЕТОД АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЙ Z-КОМПОНЕНТЫ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ IGRF В ГЕОЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

В.А. Кочнев, *kochnev@icm.krasn.ru*
Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

Z-компонента магнитного поля Земли (МПЗ) в геоцентрической системе координат наиболее наглядно и полно отображает глобальные свойства МПЗ. По разности Z-компонент анализируется динамика изменения напряженности поля и решается обратная задача для оценки изменения интенсивности источников МП в ядре. Метод иллюстрируется на примере данных IGRF 1980-2015 с интервалом 5 лет и прогноза Z-компоненты на 2515 год.

METHOD OF ANALYSIS OF CHANGES OF Z COMPONENT OF THE GEOMAGNETIC FIELD IGRF IN THE GEOCENTRIC COORDINATE SYSTEM

V.A. Kochnev, *kochnev@icm.krasn.ru*
Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

Z-component of the magnetic field of the Earth in the geocentric coordinate system clearly and fully shows the global properties of the magnetic field. From the differences of Z-components we analyzing the dynamics of change in the field and solve the inverse problem to estimate the change in intensity of the field in the core sources. The method is illustrated by the data from IGRF 1980-2015 with intervals of 5 years and prognosis of Z-component until 2515.

В настоящее время вековые вариации рассчитываются по данным глобальных магнитных съемок за каждые 5 лет. На поверхности Земли можно выделить несколько различающихся по характеру областей вековых вариаций. Средняя скорость вековых вариаций составляет около 45 нТл/год [1], однако в отдельных областях отмечена скорость до 170 нТл/год. Основными характерными особенностями вековых вариаций в настоящее время являются ослабление главной дипольной компоненты (примерно на 6.3% за сто лет) геомагнитного поля и смещение на запад линии нулевого магнитного склонения (в среднем примерно на 0.2º в год). Выявлено также [2] несколько резких изменений тренда вековых вариаций (джерков), последний из которых относится к 1992 году.

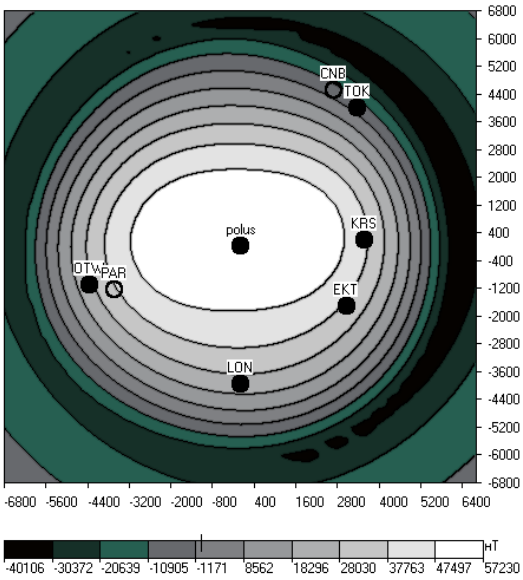
Обширная литература посвящена проблеме прогноза вековых вариаций геомагнитного поля. Экстраполяция наблюдаемых изменений, включенная, например, в модели поля IGRF [3] и WMM [4], позволяет прогнозировать изменения на несколько лет вперед, однако задача прогноза долгосрочных изменений пока не решена.

Предложен [5] метод прогноза вариаций на основе модели установившегося потока жидкости в ядре (в предположении «вмороженности» магнитного поля в жидкость). Делаются также попытки объяснить различные особенности вариаций процессами, происходящими в ядре [6] [7] и др.

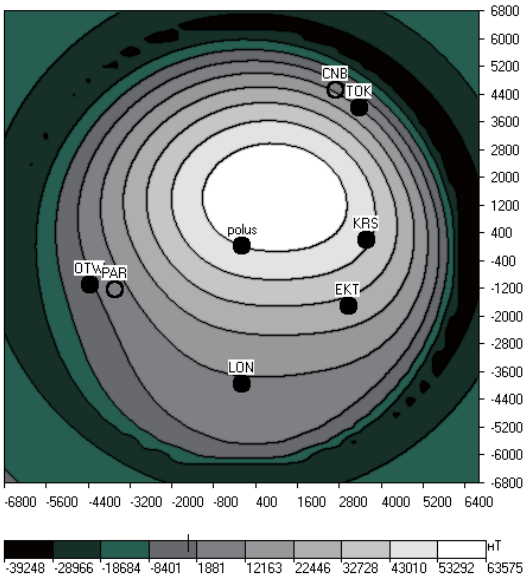
Особенность данной работы в том, что изменение поля рассматривается по Z-компоненте в геоцентрической системе координат и иллюстрируется в плане со стороны северного полюса и по результатам решения обратной задачи демонстрируется изменение источников в ядре.

На рис.1 a,b показаны Z-компонента магнитного поля IGRF-2005 северного и южного полушария на высоте 1 км. Вид со стороны северного полюса. Для ориентации на поверхности помещены сокращенные символы POL-полюса и городов: TOK – Токио, KRS – Красноярск, EKT – Екатеринбург, LON – Лондон, OTV – Оттава. Светлыми кружками отмечены два пункта в южном полушарии: CNB – Канберра (Австралия), PAR – Пунта-Аренас (южная оконечность Южной Америки).

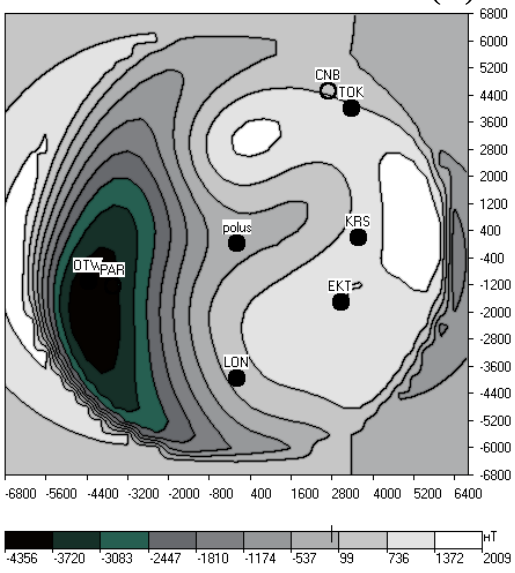
На рис.1 слева видим вытянутый в направлении 270-90º эллипс в области максимума. В правой части верхнего ряда рис.1 видим Z-компоненту МП южного полушария. В центральной части магнитное поле в геоцентрической системе является положительным. Отрицательные значения поля окаймляют положительное поле вблизи экватора.



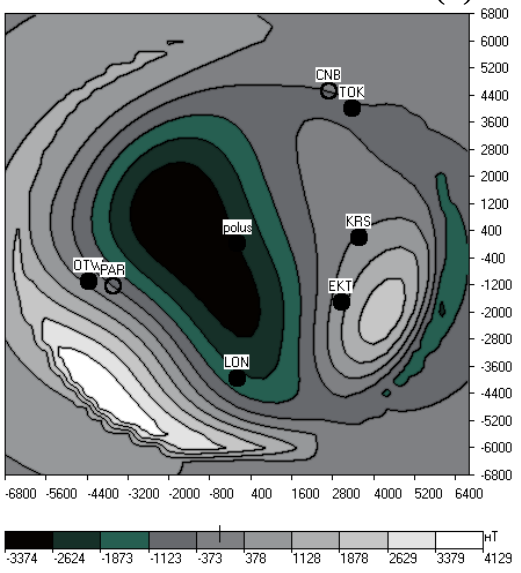
a. Z-компонента МП 2005 г. (N)



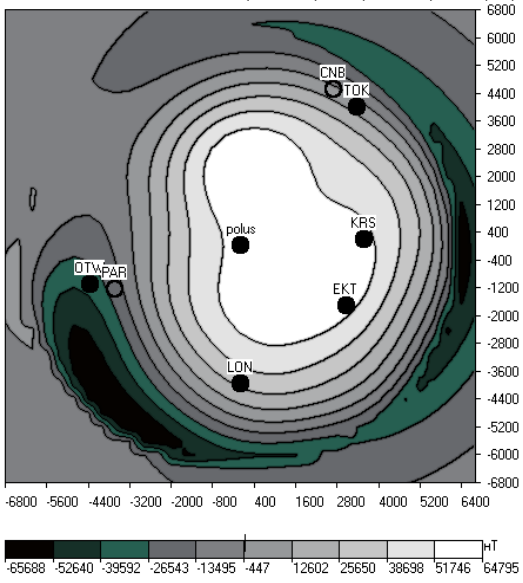
b. Z-компонента МП 2005 г. (S)



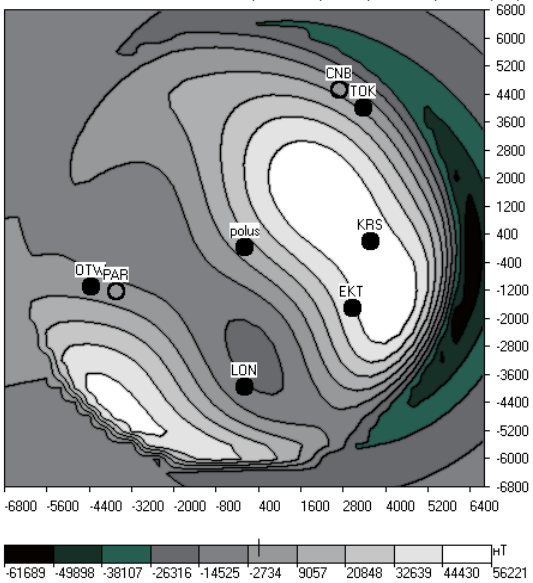
c. Разность МП Z(2005)-Z(1980) г. (N)



d. Разность МП Z(2005)-Z(1980) г. (N)



e. Прогноз Z-комп. МП Z 2515 г. (N)



f. Прогноз Z-комп. МП 2515 г. (S)

Рис.1. Компонента магнитного поля в геоцентрической системе. Вид со стороны северного полюса.

В среднем ряду рис. 1 c,d видим изменение Z-компоненты МП северного и южного полушария за период 1980-2015 г. В западной части северного полушария наблюдаем аномалию интенсивного уменьшения МП, достигающие −4350 нТл, а в восточной части увеличение, достигающее в дугообразной зоне величины 2070 нТл. В западной части за пределами планеты видим такое же интенсивное увеличение МП.

В западной части южного полушария наблюдается интенсивное уменьшение поля, достигающее −3370 нТл. Увеличение МП видим в экваториальной области от 270 до 0º долготы и в восточной части. Максимальные аномалии увеличения МП находятся в интервале 0 и 90º в Индийском океане.

В работах [8,9] показано, что МП на определенных участках поверхности Земли изменяется со временем квазилинейно. В среднем скорость изменения магнитного поля в южном полушарии составляла от -95 до115 нТл в год. В северном полушарии от -120 до 55 нТл в год. В узкой экваториальной зоне картина обратная: увеличение поля в западной и уменьшение - в восточной. Подмеченная закономерность дает возможность сделать прогноз Z-компоненты МП на некоторый временной интервал вперед. На рисунке 1e,f показан такой прогноз на 2515 год. Цель получения такого прогноза – проиллюстрировать изменчивость МП за короткий (в геологическом смысле) период. В данном примере за 500 лет в западном полушарии вместо положительной Канадской аномалии получена отрицательная глобальная аномалия с амплитудой -65000 нТл. В то же время в восточной части расширилась Сибирско-Азиатская аномалия. В южном полушарии растянулась широтно Австралийская аномалия. Кроме этого, в секторе 270-0º долгот вдоль экваториальной зоны появилась положительная аномалия, которая в плане приблизительно совпадает с отрицательной аномалией северного полушария. Многими исследователями (в т.ч. Б.М.Яновским) указывалось, что частота изменений локальных инверсий МП на много порядков больше частоты геологических процессов.

Попытаемся оценить возможное положение источников, увеличивающих или уменьшающих МП. Если источники изменения находятся на поверхности планеты, то их местоположение совпадает с положением аномалий разности.

Более вероятным является вариант изменения интенсивности источников ядра. Решая обратную задачу с помощью пакета ADM-3D-earth [10], получим вариант изменения интенсивности источников. В восточной части северного полушария видим дугообразную аномалию увеличения интенсивности с максимумом 321 А/м.

Уменьшение интенсивности источников проявляется в западной части и достигает -173 А/м. В южном полушарии ядра уменьшение источников ядра, находящихся в средних широтах ядра с центром на 0º долготе, с минимумом -286 А/м, а максимум увеличения источников, находящихся в восточной части, равен 348 А/м. В целом для всей модели ядра Земли максимальный рост интенсивности источников составляет в восточной части ядра 231 и 348 А/м и уменьшается в западной с минимумами -173, -286 А/м.

Такое неравномерное изменение источников может быть вызвано двумя основными причинами: изменением скорости и направления движения жидкой субстанции и температуры в разных частях ядра.

Выводы

1. По Z-геоцентрической компоненте вектора магнитного поля при наблюдении со стороны северного полюса наглядно выделяются особенности МП Земли.
2. В северном полушарии наблюдается плавное увеличение МП Сибирско-Азиатской аномалии и интенсивное уменьшение Канадской глобальной аномалии.
3. В южном полушарии отмечено интенсивное уменьшение Южно-Атлантической аномалии (около 100 нТл/год) и увеличение МП западнее и восточнее этой аномалии. Причем наблюдается увеличение скорости роста восточной аномалии.

4. По разности Z-компонент в период 1980-2015 г.решена обратная задача для определения изменения эффективной намагниченности ядра. Выделены аномалии изменения источников от −250 до 370 А/м за период в 35 лет.
5. Получен пробный линейный прогноз Z-компоненты МПЗ на 2515 год.

С использованием классических и новых работ будет сделан анализ инверсий МП в период фанерозоя.

Литература

1. Government of Canada N.R.C. Secular variation [Электронный ресурс]. 2010. URL: http://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/sec-eng.php (дата обращения: 06.12.2013).
2. Courtillot V., Le Mouël J.-L. Geomagnetic secular variation impulses. // Nature. 1984. Т. 311. С. 709–716.
3. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD. и др. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation // Geophysical Journal International. 2010. Т. 183, № 3. С. 1216–1230.
4. Maus S., Macmillan S., McLean S., Thomson A.W.P., Nair M., Rollins C. The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015, NOAA Technical Report NESDIS/NGDC. 2011.
5. Beggan C.D., Whaler K.A. Forecasting secular variation using core flows // Earth, Planets and Space. 2010. Т. 62, № 10. С. 821–828.
6. Aubert J., Finlay C.C., Fournier A. Bottom-up control of geomagnetic secular variation by the Earth/’s inner core // Nature. 2013. Т. 502, № 7470. С. 219–223.
7. Finlay C.C., Dumberry M., Chulliat A., Pais M.A. Short Timescale Core Dynamics: Theory and Observations // Space Sci Rev. 2010. Т. 155, № 1-4. С. 177–218.
8. Кочнев В.А. Изменения Z-компоненты геомагнитного поля IGRF в геоцентрической системе координат в период 1980-2005 гг. // Международная конференция MSS-14 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность». Москва, 2014.
9. Кочнев В.А. Изменения Z-компоненты геомагнитного поля IGRF в геоцентрической системе координат в период 1980-2005 г. // 41-я сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологиче-ской интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». Екатеринбург, 2014. С. 121–124.
10. Кочнев В.А., Гоз И.В. Нераскрытые возможности магнитометрии // Геофизика. 2006. № 6. С. 51–55.

УДК 523.42

ОБРАТНОЕ ВРАЩЕНИЕ ВЕНЕРЫ И ЕЕ ХОЛОДНОЕ ЯДРО – РЕАЛЬНОСТЬ ИЛИ ОШИБКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ?

***В.А. Кочнев**, kochnev@icm.krasn.ru*

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

«Изучая другие планеты, мы приближаемся к новым разгадкам тайн нашей планеты Земля». Из фольклора исследователей.

Приведена краткая историческая справка о результатах исследования периода и направления вращения Венеры. Изложены результаты анализа аргументов и признаков ретроградности вращения планеты и сделан вывод об их ошибочности. В пользу нормального вращения планеты приводятся результаты моделирования магнитного поля Венеры, установленная слабая сейсмологическая активность (практическое ее отсутствие) и модель формирования вращения планет в теории О.Ю. Шмидта, В.С. Сафонова и других.

REVERSE ROTATION OF VENUS AND ITS COLD CORE - REALITY OR AN ERROR OF INTERPRETATION OF GEOPHYSICAL DATA?

***V.A. Kochnev**, kochnev@icm.krasn.ru*

Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

A brief historical background is given concerning the results of investigating the period and direction of Venus rotation. The analysis results of the evidence and features of the retrograde planetary rotation are presented, with the conclusion about the evidence incorrectness being made. Presented in favor of the normal planetary rotation are the results of modeling the magnetic eld of Venus, the weak planetary seismic activity (its actual absence) as well as the model of the planetary rotation formation described in the theory by O.Y. Schmidt, V.S. Safronov et al.

По результатам космических съемок напряженность магнитного поля Венеры на экваторе не превышает 3 нТл [2]. Интерпретируя этот результат, опираясь на электронную модель геодинамо, исследователи пришли к выводу, что ядро планеты холодное, а, следовательно, не жидкое, а твердое.

При радарных исследованиях американские и советские специалисты столкнулись со многими сложными техническими проблемами, которые со временем были преодолены [3]. Но однозначно решить проблему направления вращения планеты не удалось. Дело в том, что пучок импульсов радиорадара с Земли охватывает всю исследуемую планету. При этом по доплеровскому спектру отраженных от планеты волн легко определить с какой скоростью удаляется или приближается планета. Но определить однозначно направление вращения планеты невозможно, т.к. одна ее сторона удаляется, а другая приближается. Американский исследователь Р. Карпентер [13, 16] после длительного анализа особенности левой отрицательной части спектра предположил, что она соответствует отражению, расположенному в левой части планеты (см. рис. 1) [13]. Это и предопределило ретроградное направление вращения планеты, т.е. по часовой стрелке, если смотреть со стороны Полярной звезды. Здесь следует заметить, что все планеты солнечной системы вращаются и обращаются вокруг Солнца против часовой стрелки. Точно так же вращаются спутники и обращаются вокруг своих планет.

Некоторые исследователи под руководством В.А. Котельникова поддержали вариант Карпентера и на XIV Ассамблее МАС в 1970 году по представлению американских и советских ученых принято, что вращение планеты Венера является обратным.

Спустя десять лет в сборнике [3] опубликован результат с нормальным вращением, полученный ранее В.К. Головковым. В этой же статье приведен рисунок, аргументирующий ретроградность вращения. Таким образом проблема остается.

КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВРАЩЕНИЯ ВЕНЕРЫ

В истории оптических наблюдений Венеры было несколько оценок периода вращения вокруг своей оси: от 23 ч 21 мин до 224 сут [1]. В соответствии с последней упомянутой оценкой, подобно Луне, которая все время одной стороной обращена к Земле, Венера обращена к Солнцу. В этом случае периоды обращения и вращения совпадают, а направление вращения совпадает с направлением вращения других планет, то есть оно против часовой стрелки, если смотреть со стороны Полярной звезды. В 1962 г. советскими и американскими учеными было сделано заключение, что Венера вращается с периодом 244 суток в обратном направлении, что вызвало у астрономов массу невероятных предположений. Главные из них катастрофа – столкновение со спутником или Венера является “пришельцем” извне. Но обе эти гипотезы не имеют подтверждающих признаков. Венера имеет почти круговую орбиту. Ось вращения практически ортогональна плоскости эклиптики.

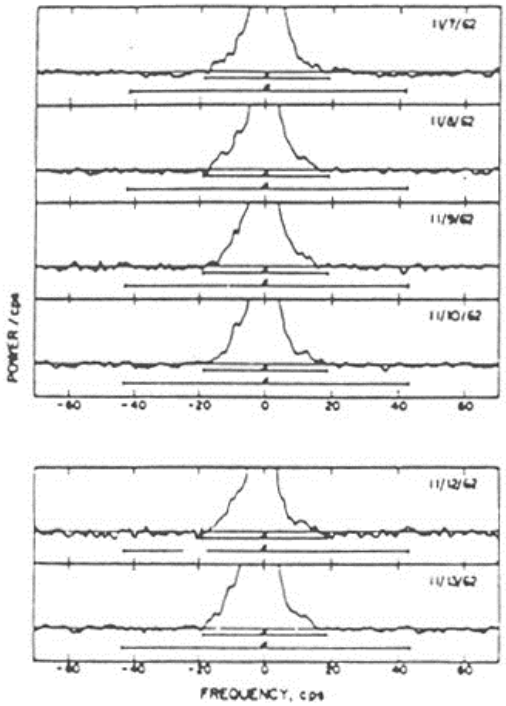


Рис. 1. Доплеровские спектры, приведенные Карпентером в качестве доказательства ретроградного вращения Венеры. *Lower portion of the spectra obtained by Roland Carpenter during the week prior to the 1962 conjunction of Venus. Note the persistent detail on the left side of each spectrum. Carpenter followed that detail to determine the retrograde motion of Venus* (*Courtesy of Jet Propulsion Laboratory*).

Итак, имеются две противоречивые модели вращения Венеры нормальное и обратное (ретроградное). Важным фактом является то, что Венера имеет очень слабое магнитное поле (на 4 порядка меньше земного). Проанализировав оба варианта с точки зрения новой кинематико-гравитационной модели генерации магнитного поля планет [2, 3, 9] и доводы других исследователей, приходим к результатам, обсуждаемым ниже.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Рассмотрено две основе модели вращения Венеры: нормальная и ретроградная. Им соответствуют два периода вращения T=225 и T=-243 суток.

2. Периоды устойчиво определяются по интервалу времени между нижними соединениями, когда удается получить идентичные доплеровские спектры в предыдущем и последующем сближениях Земли и Венеры. Именно идентичность спектров (таких как на нижних кадрах рис. 2) позволяет утверждать, что при нижнем соединении Венера обращена к наблюдателю

на Земле одной и той же стороной. Предполагая нормальное вращение, получаем оценку периода 225 суток. При таком периоде нормального вращения длина солнечного дня Венеры стремится к бесконечности, т.е. Венера постоянно обращена к Солнцу одной стороной, что и предполагалось ранее [1].

При обратном вращении длина солнечных суток на Венере будет равна 116.745 суткам, т.е. за период нижних соединений (583.7) она должна сделать ровно 5 оборотов вокруг своей оси, что мало вероятно. Именно направление и период вращения Венеры относительно Солнца предопределяет разные свойства двух моделей.

Рис. 2. Доплеровские спектры, полученные на длине волны 39 см вблизи нижних соединений Венеры (соответственно 19 июня 1964 г. и 26 января 1966 г.).

Центральный максимум соответствует сигналам, отраженным центром диска планеты. Стрелками отмечены детали, обусловленные областями поверхности с повышенной отражательной способностью. Спектры, отстоящие го времени на равное число суток относительно моментов нижнего соединения, совмещены между собой, чтобы показать повторяемость их деталей.

3. При нормальном вращении, совпадающем с периодом обращения планеты вокруг Солнца, на Венере приливные гравитационные силы от Солнца близки к 0, а, следовательно, и магнитное поле будет близко к 0, что и подтверждается спутниковыми наблюдениями. Этим же объясняется слабая сейсмическая активность, установленная сейсмологическими аппаратами [1]. При обратном вращении напряженность магнитного поля достигла бы – 210 нТл, чего реальными наблюдениями не подтверждается.

4. Проведен анализ доплеровских спектров и доводов, на основе которых был сделан вывод о ретроградном вращении планеты. Делается вывод об ошибочной интерпретации спектров. Анализируя спектры наблюдений 1962 г., Карпентер предположил, что отрицательная, следовательно, левая часть спектра соответствует отражающим объектам левой части планеты и пришел к выводу о ретроградном вращении Венеры.

Головков В.К. [3] получил аналогичное поведение спектров, но предположив, что отражающие объекты, соответствующие отрицательным спектрам, расположены в правой части планеты, пришел к модели нормального вращения (рис. 3, 4).

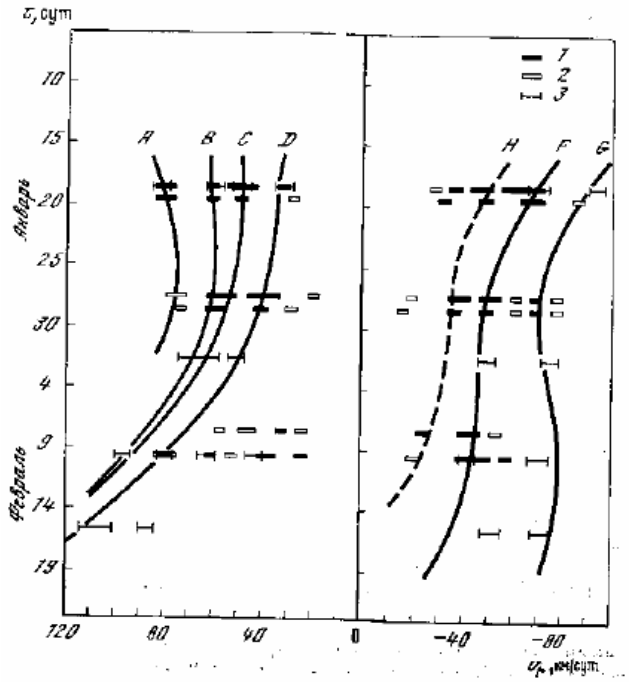


Рис. 3. [Головков В.К.] [3]. Лучевые скорости областей поверхности Венеры с повышенной отражательной способностью по наблюдениям 1966 г.
1 – уверенно отождествляемые и 2 – сомнительные спектральные детали по наблюдениям на волне 39 см. 3 – спектральные детали по наблюдениям на волне 3.8 см.

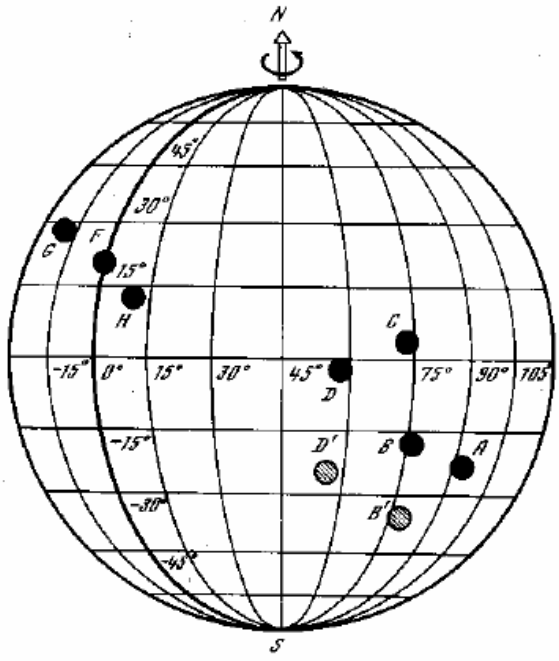


Рис. 4. [Головков В.К.] [3]. Расположение центров областей с повышенной отражательной способностью на диске Венеры.

5. В данной работе показано, что ширина доплеровского спектра зависит от положения крайних отражающих объектов и подлокаторной точки. Минимум ширины спектра будет получен тогда, когда подлокаторная точка будет находиться в средней части относительно удаленных отражающих объектов, и не зависит от направления вращения и скорости вращения. Отсюда следует ошибочность утверждения о том, что при нижнем соединении минимум ширины спектра объясняется обратным направлением вращения планеты.
6. На основании отсутствия магнитного поля и слабой сейсмологической активности планеты сделан вывод: Венера является планетой с нормальным вращением с периодом 225

суток, что согласуется с результатами и других исследователей (Джон Томсон, специалисты IPL Lincoln laboratory, некоторые специалисты института радиотехники и электроники [3].

7. Ретроградность вращения не находит логичного научного объяснения. Нормальное вращение планеты, совпадающее с направлением обращения вокруг Солнца, логично обосновано в теории О.Ю. Шмидта, В.С. Сафонова и др.

Что касается оценок периода по спутниковым наблюдениям, то необходимо заметить следующее. В анализируемых работах, в частности [15], при интерпретации за априорную основу была принята ретроградная оценка и период 243 суток, а варианты нормального вращения не рассматриваются. Это могло стать причиной систематического смещения периода. О возможности систематических ошибок указывается в заключительной части работы [15].

В докладе будет представлен развернутый анализ затронутой темы.

Благодарности. Автор признателен моим оппонентам, нашедшим аргументы ретроградности, и Тимошиной И.В., благодаря помощи которой работа завершена.

Литература:

1. Галкин И.Н. Внеземная сейсмология. М.: Наука, 1988. 191 р.
2. Гордин В.М. Очерки по истории геомагнитных измерений. М.: ИФЗ РАН, 2004. 161 с.
3. Котельников В.А., Ржига О.Н., Александров Ю.Н. и др. Развитие радиолокационных исследований планет в Советском Союзе. // Проблемы современной радиотехники. М., Наука, 1980.
4. Кочнев В.А. Косвенные факты и явления, подтверждающие модель генерации магнитного поля при движении заряженного расплава ядра // Материалы 39 Международного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». Воронеж, 2012. С. 149–152.
5. Кочнев В.А. Кинематико-гравитационная модель геодинамо // Геофизический журнал, 2013. Т. 35, № 4. С. 3–15.
6. Кочнев В.А. Обоснование тока кинематико-гравитационной модели геодинамо. // Седьмые научные чтения Ю.П. Булашевича. Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Екатеринбург, 2013. С. 162–164.
7. Кочнев В.А. Кинематико-гравитационная ионная модель геодинамо – результат решения обратной задачи по глобальному магнитному полю Земли. // Сборник тезисов. Крымская международная математическая конференция КММК-2013. Судак, Украина, 2013. С. 56.
8. Головков В.К. и др. Вариации отражательной способности. Астрономич. журнал, 1976. Т. 53, вып. 2.
9. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982.
10. Ржига О.Н. Новая эпоха в исследовании Венеры. Знание, 1988.
11. Шмидт О.Ю. Четыре лекции о теории происхождения Земли. АН СССР, 1957.
12. Kochnev V. Empirical kinematic-gravitational model of generation of magnetic fields of planets // VI-th International Conference - Solitons, collapses and turbulence: Achievements, Developments and Perspectives. Novosibirsk, 2012. P. 90.
13. http://history.nasa.gov/SP-4218/ch2.htm
14. Luhman J.G. Russel C.T. Venus: magnetic field and magnetosphere / Encyclopedia of planetary sciences; http//www-spc.igpp.ucla.edu/personnal/papers/ venus/mag/
15. N. T. Mueller J.H. Rotation period of Venus estimated from Venus Express VIRTIS images and Magellan altimetry // Icarus. 2012. Т. 217. С. 474–483
16. Carpenter R.L. Stady of Venus by CW Radar – 1964. Results Astronomical Journal. Vol. 71. Number 2. 1966.

УДК 528.87

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ ФЛЮИДОВ В КОЛЛЕКТОРАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ГЛУБИННЫХ ГОРИЗОНТОВ РАЗРЕЗА

С.П. Левашов[1], Н.А. Якимчук[1], И.Н. Корчагин[2]*, korchagin@karbon.com.ua*
1-Институт прикладных проблем экологии, геофизики и геохимии, Киев, Украина,
2-Институт геофизики НАНУ им. С.И. Субботина, Киев, Украина

Анализируются результаты оценки перспектив нефтеносности ряда участков и структур в Днепровско-Донецкой (ДДВ) и Прикаспийской впадинах. Они получены с использованием мобильной технологии частотно-резонансной обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с целью «прямых» поисков и разведки месторождений рудных и горючих полезных ископаемых. Результаты дешифрирования данных ДЗЗ – это новая (дополнительная) и, главным образом, независимая информация, которая может быть полезной и востребованной на любом этапе геологоразведочного процесса на нефть и газ. Применение методики оценки относительных значений средних пластовых давлений позволяет еще более существенно сузить области проведения детальных поисковых работ первоочередного характера и задания разведочных скважин.

ON POSSIBILITY TO USE THE VALUES OF FLUID PRESSURE IN RESERVOIRS TO ASSESS THE PROSPECTS OF OIL-GAS CONTENT IN DEEP HORIZONS

S.P. Levashov[1], N.A.Yakymchuk[1], I.N. Korchagin[2]*, korchagin@karbon.com.ua*
[1]Institute of Applied Problems of Ecology, Geophysics and Geochemistry, Kyiv, Ukraine
[2]Institute of Geophysics of Ukraine National Academy of Science, Kyiv, Ukraine

The results of evaluation of the prospects of a number of oil-bearing areas and structures in the Dnieper-Donets basin (DDB) and the Caspian basin are analyzed. They were obtained with the mobile technology of frequency-resonance processing and interpretation of remote sensing (RS) using for the "direct" prospecting and exploration of ore mineral and fossil fuels. We can say, in general, that the results of remote sensing data interpretation is a new (additional) and mainly independent information that can be useful and in demand at any stage for the oil and gas prospecting. Applying the method of maximum value of fluid pressure in reservoir assessing allows even more significantly narrow the areas of detailed exploration of priority character conducting and exploration wells locating.

Введение. При освоении углеводородного потенциала больших глубин существенно увеличиваются материальные затраты на бурение скважин. Это требует дополнительной оценки выдаваемых на бурение рекомендаций. Один из путей оперативного получения дополнительной и независимой информации – использование при поисках скоплений нефти и газа мобильных геофизических методов.

С 2010 г. авторы начали апробацию мобильной технологии частотно-резонансной обработки и интерпретации (дешифрирования) данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с целью поисков и разведки горючих и рудных полезных ископаемых, водоносных коллекторов [3-5]. Она позволяет обнаруживать и картировать аномальные зоны типа «залежь нефти», «залежь газа», «залежь газогидратов», «водоносная залежь», и т.д. В докладе анализируются результаты применения этой технологии для оценки нефтеносности глубинных горизонтов (в том числе и подсолевых отложений) на отдельных участках в Днепровско-Донецкой (ДДВ) и Прикаспийской впадинах.

Результаты исследований в ДДВ. *Нефтегазоперспективная площадь в Полтавской области.* В 2006 г. на площади проведены наземные геоэлектрические исследования методами СКИП и ВЭРЗ [5]. Здесь съемкой СКИП закартированы аномалии типа «залежь» (АТЗ) площадью свыше 20 км^2. В интервале глубин 5200-5800 м зондированием ВЭРЗ в их

пределах установлено наличие аномально поляризованных пластов (АПП) типа «газ» и «газоконденсат». В 2011 г. дополнительно обработаны данные ДЗЗ этой площади (рис. 1). В результате, в пределах закартированных АТЗ выделены участки с относительно высокими значениями максимального пластового давления в коллекторах, что дополнительно подтверждает их перспективность. При этом изолиния аномалий со значением 70 МРа очерчивает область, где могут быть получены притоки УВ с интервала глубин до 7000 м.

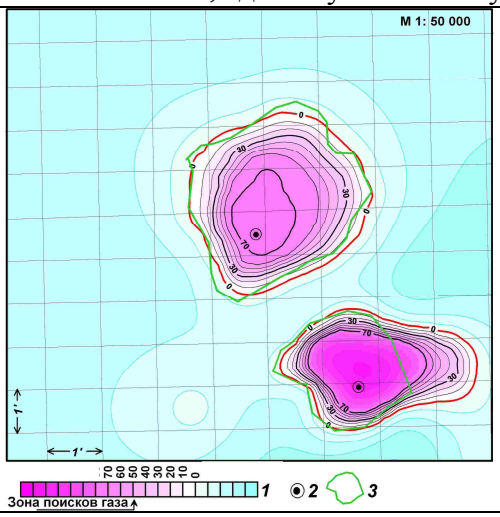


Рис. 1. Карта аномальных зон типа «газовая залежь» на поисковом участке в ДДВ. *1* – шкала значений пластового давления газа (в МПа); *2* – места, рекомендованные для зондирования ВЭРЗ и бурения скважин; *3* – контуры АТЗ по данным съемки СКИП.

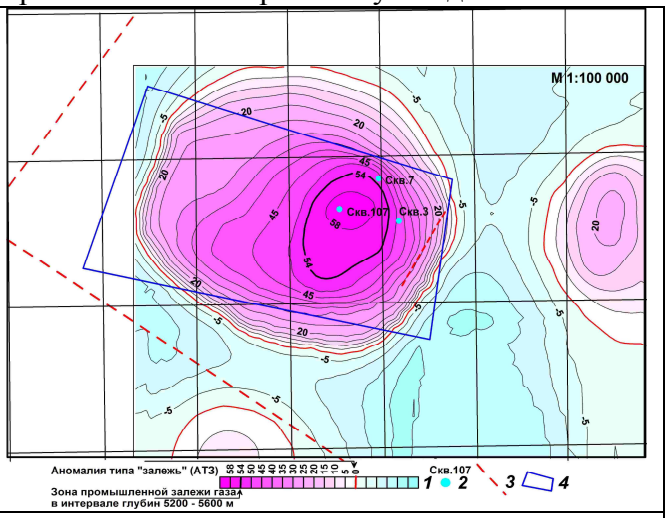


Рис. 2. Карта аномальных зон типа "газовая залежь" в районе газового месторождения. *1* – шкала средних значений пластового давления (МПа); *2* – пробуренные скважины; *3* – тектонические нарушения; *4* – контуры лицензионного участка.

Газовое месторождение в Полтавской области. Дешифрирование спутниковых данных в районе известного месторождения также проводилось с использованием методики оценки значений пластового давления газа в коллекторах [4]. В результате, на участке выделена относительно крупная по площади аномальная зона типа «залежь газа» (рис. 2).

На рис. 2 аномальные зоны представлены в изолиниях максимальных значений пластового давления (в МРа). Изолиния со значением 54 МРа очерчивает оптимальный участок для поисков газа в интервале глубин 5200-5800 м (на глубинах расположения залежей в горизонтах В17 и В21, начальное пластовое давление в них 54.13 МРа и 58.63 МРа). Площади закартированных аномальных зон следующие: Центральная: общая (нулевая изолиния) – 44.0 км^2, по изолинии 54 – 4.3 км^2; Восточная: общая – 9.8 км^2. Максимальные значения пластового давления в районе Восточной аномалии – порядка 20 МРа (рис. 2). Это свидетельствует о том, что получить промышленные притоки УВ из интервала расположения горизонтов В17 и В21 нереально.

Продуктивная скважина 107 (рис. 2) попадает в центр области с изолинией 58 (максимальные значения пластового давления в коллекторах). Непродуктивные скважины 3 и 7 расположены за пределами изолинии 54. Возможно, что в этих скважинах не получены промышленные притоки газа из-за относительно низких значений пластового давления (по сравнению с гидростатическим на глубинах расположения коллекторов). В непродуктивных скважинах установлено ухудшение коллекторских свойств продуктивных горизонтов.

О возможности обнаружения скоплений газа в плотных песчаниках. Наличие залежей газа в такого типа коллекторах прогнозируется по геолого-геофизическим данным в глубинных горизонтах разреза на востоке ДДВ, в районе расположения Беляевского соляного штока, а также Новомечебиловской и Словянской структур.

В районе Беляевского штока обнаружена зона с относительно высокими значениями пластового давления в коллекторах (свыше 56 МРа). На участке площадью 2280 км^2, включающем Новомечебиловскую структуру, обнаружено и закартировано шесть

аномальных зон типа «газовая и газоконденсатная залежь» различных размеров по площади и интенсивности. Общая площадь всех аномальных зон – 136.48 км^2. В районе расположения структуры Славянская обработаны данные ДЗЗ участка площадью 670 км^2. В его пределах обнаружено и закартировано две аномальные зоны площадью 80.0 и 8,9 км^2, соответственно.

Результаты экспериментальных исследований позволяют констатировать следующее:

а) частотно-резонансный метод обработки данных ДЗЗ [3-4] позволяет обнаруживать в областях распространения нетрадиционных коллекторов зоны “Sweet spots”, в пределах которых из пробуренных скважин могут быть получены коммерческие притоки газа;

б) использование этого метода при поисках и разведке скоплений УВ в нетрадиционных коллекторах (угленосных и кристаллических породах, сланцах, плотных песчаниках) позволяет оптимизировать расположение поисковых, разведочных и добывающих (эксплуатационных) скважин, а, следовательно, существенным образом сократить их количество и вредное воздействие на окружающую среду.

Результаты применения в Прикаспийской впадине. *Лицензионный блок «Атырау» [1-2].* Исследованиями в пределах блока «Атырау» установлено отсутствие аномальных зон с высокими значениями пластового давления в коллекторах (рис. 3). Следовательно, вероятность обнаружения здесь подсолевых залежей на глубинах свыше 3000 м практически равна нулю, а скважина глубиной 7050 м (в окрестностях аномальной зоны Тасым, юго-западная часть блока, рис. 3) пробурена в заведомо неперспективном месте.

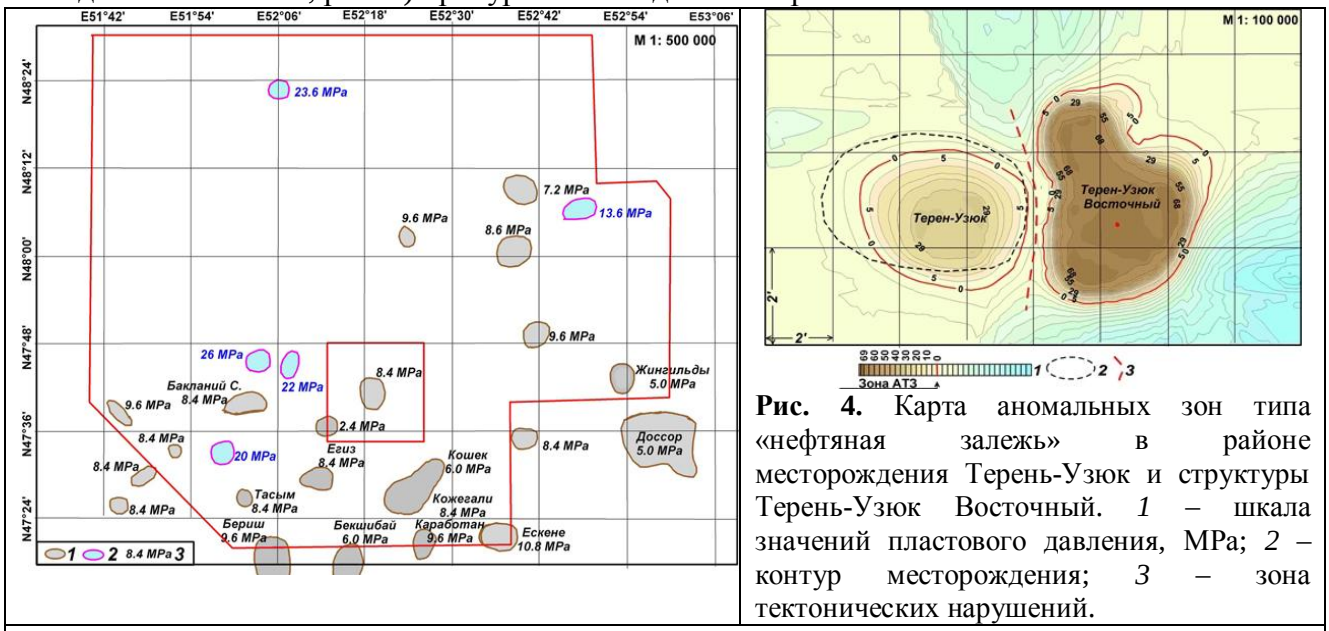


Рис. 4. Карта аномальных зон типа «нефтяная залежь» в районе месторождения Терень-Узюк и структуры Терень-Узюк Восточный. *1* – шкала значений пластового давления, МРа; *2* – контур месторождения; *3* – зона тектонических нарушений.

Рис. 3. Схематическая карта аномальных зон типа «нефтяная залежь» на площади лицензионного блока «Атырау» (Республика Казахстан). *1* – шкала максимальных значений пластового давления, МРа. *1* – аномальные зоны, обусловленные АПП типа «нефть» в надсолевой толще; *2* – предположительно аномальные зоны, обусловленные «подкарнизными» АПП типа «нефть».

Полученные оценки значений пластового давления в 69 МРа в районе структуры Терен-Узюк Восточный свидетельствуют о возможном наличии здесь подсолевых залежей нефти (рис. 4). Сопоставление закартированной в этом районе аномалии с аномальной зоной на известном месторождении Тенгиз (рис. 5), указывает на возможность обнаружения в пределах структуры Терен-Узюк Восточный относительно крупного месторождения УВ.

В статье [1, рис. 9, с. 104] приводится карта структур, выделенных в южной части блока Атырау сейсмическими работами. На карте также показано положение нескольких скважин (в том числе и глубокой – 7050 м), из которых согласно [1-2] в процессе испытаний не получены притоки УВ. Сопоставление этой карты со схемой расположения обнаруженных и закартированных аномальных зон типа «залежь нефти» показало, что пробуренные здесь скважины не попадают в контуры выделенных аномалий (рис. 6).

Совместный анализ результатов обработки данных ДЗЗ блока «Атырау» с материалами аналогичных исследований в пределах четырех крупных площадей в Северо-

Тургайском районе позволяет констатировать о высокой вероятности обнаружения в этом регионе промышленных скоплений УВ, а, следовательно, и открытии нового нефтегазоносного района в Республике Казахстан [6].

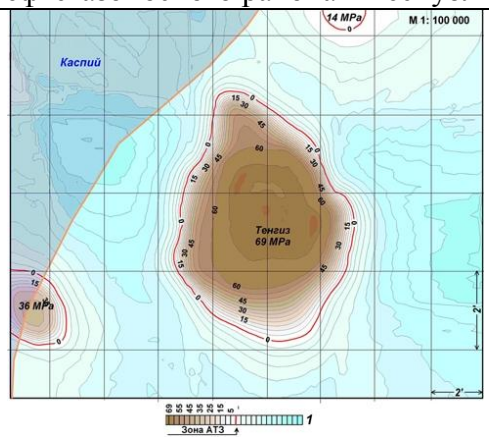


Рис. 5. Карта аномальных зон типа «нефтяная залежь» в районе месторождения Тенгиз. *1* – шкала значений пластового давления, МРа.

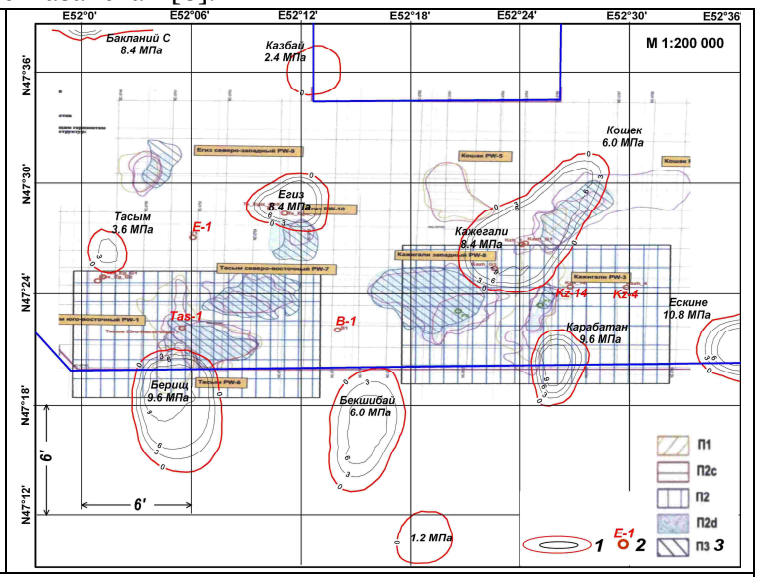


Рис. 6. Карта-схема аномальных зон типа «залежь нефти» на схеме перспективных структур в южной части лицензионного блока «Атырау» (Республика Казахстан). *1* – изолинии максимальных значений пластового давления, МПа; *2* – пробуренные скважины; *3* – перспективные структуры по выделенным отражающим горизонтам [1].

Структура EMBA-B (NUR) в пределах блока E [7]. Целесообразность исследований на структуре была обусловлена бурением глубокой скважины NUR-1 (7250 м). В связи с этим результаты обработки данных ДЗЗ могут быть заверены бурением (если скважина будет добурена до проектной глубины, естественно). На настоящий момент она пробурена до глубины 5,681 м, затрачено 39 млн. дол. США. Для добуривания скважины до проектной глубины еще необходимо порядка 12-20 млн. дол. США [www.maxpetroleum.com].

Данные ДЗЗ района расположения структуры EMBA-B обработаны в масштабе 1:50000. Это самый крупный масштаб обработки отдельного участка по сравнению с масштабами обработки в пределах блока «Атырау» [6]. Результаты обработки показаны на рис. 7. В пределах контура структуры EMBA-B непосредственно обнаружено и закартировано три аномальные зоны типа «нефтяная залежь» различных размеров. Еще одна аномалия зона зафиксирована за пределами структуры EMBA-B (рис. 7). В пределах обнаруженных аномальных зон оценки максимальных значений пластового давления составляют 73 МРа! Результаты дешифрирования позволяют констатировать следующее.

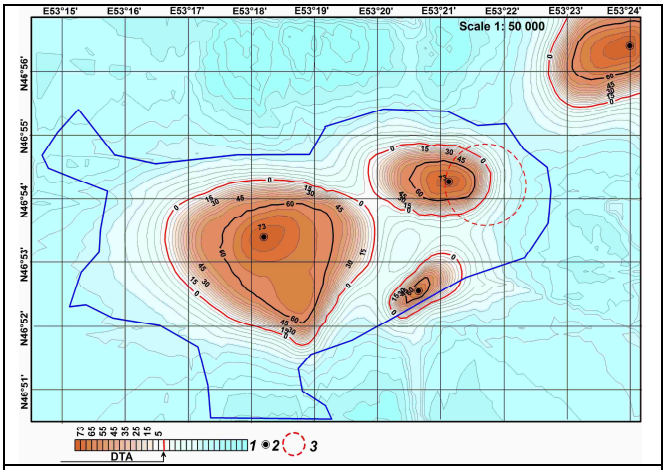


Рис. 7. Карта аномальных зон типа «нефтяная залежь» в пределах структуры EMBA-B и скважины NUR-1. *1* – шкала значений пластового давления, МРа; *2* – центральные точки аномалий; *3* – контур возможного нахождения скважины.

1. Полученные оценки максимальных значений пластового давления в 73 МРа свидетельствуют о высокой вероятности получения коммерческих притоков нефти из подсолевого горизонта в центральных областях обнаруженных аномальных зон!

2. Общая площадь закартированных аномалий существенно меньше площади структуры EMBA-B. Суммарная площадь фрагментов аномалий с относительно высокими значениями пластового давления (свыше 60 МРа) еще меньше (рис. 7).

3. Если точка бурения скважины NUR-1 не попадает в контуры изолинии со значением 60 МРа, то коммерческие притоки нефти в скважине после завершения ее бурения до проектной глубины можно и не получить!

В пределах обследованной структуры могут быть проведены дополнительные работы.

1. Обработка данных ДЗЗ района расположения скважины в более крупном масштабе – 1:10000 и крупнее. Это позволит детализировать контуры аномалий.

2. В районе скважины NUR-1 могут быть выполнены наземные исследования методами СКИП и ВЭРЗ [5]. Помимо уточнения контуров аномалий съемкой методом СКИП, зондирование ВЭРЗ позволит оценить глубины залегания и мощности аномально поляризованных пластов (АПП) типа «нефтяная залежь» в разрезе участка. При этом могут быть получены оценки значений пластового давления в отдельных АПП типа «нефтяная залежь». Проведение зондирований ВЭРЗ по плотной системе точек позволяет получить оценки ресурсов нефти как в отдельных АПП типа «нефтяная залежь», так и во всем разрезе.

3. Перечисленные в пунктах 1 и 2 исследования могут быть проведены и в пределах всех структур лицензионного блока Е [7]. Полученные в результате таких работ материалы могут быть использованы при выборе оптимальных мест заложения поисковых скважин.

4. Метод частотно-резонансной обработки данных ДЗЗ предоставляет также возможность оперативно обнаружить и закартировать в пределах блоков «Е» и «А» [7] возможные участки скопления залежей УВ в ловушках неструктурного типа.

Выводы. Приведенные результаты апробации технологии частотно-резонансной обработки и дешифрирования данных ДЗЗ позволяют отметить следующее.

а) В пределах изученных сейсморазведкой 2Д и 3Д блоков и закартированных структур могут быть перспективные участки, которые располагаются не в сводах структур.

б) Такие участки могут быть оперативно обнаружены и закартированы методом частотно-резонансной обработки данных ДЗЗ.

в) Обработка данных ДЗЗ изученных сейсморазведкой блоков позволит получить более полную информацию о перспективах их нефтегазоносности. В результате проведения таких работ оперативно могут быть также выявлены участки возможного скопления УВ в ловушках неструктурного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гета С.П., Жемчужников В.Г., Нугманов Я.Д., Уваков К.А. Геологоразведка северного склона Астраханско-Актюбинской системы поднятий на Атырауском блоке. Прикаспийская впадина: актуальные проблемы геологии и нефтегазоносности. Труды ОНГК. Вып. 1. Атырау 2012. – С. 96-106.

2. Гета С.П., Ескожа Б.А., Жемчужников В.Г., Нугманов Я.Д., Уваков К.А. О перспективах нефтегазоносности надсолевых отложений триаса на блоке Атырау. Прикаспийская впадина: актуальные проблемы геологии и нефтегазоносности. Труды ОНГК. Вып. 1. Атырау 2012. – С. 183-187.

3. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. Новые возможности оперативной оценки перспектив нефтегазоносности разведочных площадей, труднодоступных и удаленных территорий, лицензионных блоков // Геоинформатика. – 2010. – № 3. – С. 22-43.

4. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. Оценка относительных значений пластового давления флюидов в коллекторах: результаты проведенных экспериментов и перспективы практического применения // Геоинформатика. – 2011. – № 2. – С. 19-35.

5. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. Частотно-резонансный принцип, мобильная геоэлектрическая технология: новая парадигма геофизических исследований // Геофизический журнал. – 2012. – Т. 34, № 4. – С. 167-176.

6. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. Использование мобильных геофизических технологий для оценки перспектив нефтегазоносности крупных блоков и глубинных горизонтов разреза (Прикаспийская впадина, Республика Казахстан) // Геоинформатика. – 2012. – № 4. – С. 5-18.

7. Мурзагалиев Р.С., Таутфест Дж.Б. Новая перспективная зона нефтегазонакопления в палеозойских отложениях на южном склоне Гурьевского свода. Прикаспийская впадина: актуальные проблемы геологии и нефтегазоносности. Труды ОНГК. Вып. 1. Атырау 2012. – С. 90-95.

УДК 550.3:550.4

ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ МЕГАПОЛИСА

***Д.Н. Локтев, А.А. Спивак**, loctev@idg.chph.ras.ru, spivak@idg.chph.ras.ru*
ФГБУН Институт динамики геосфер РАН, 119334, г. Москва, Россия

Анализируются результаты синхронной регистрации сейсмических колебаний, электрического и акустического полей в условиях г. Москвы (Центр геофизического мониторинга ИДГ РАН). Определены основные интервалы изменения амплитуд физических полей в условиях спокойной и возмущенной атмосферы. Отмечается синхронность вариаций физических полей и изменений параметров, характеризующих атмосферу.

PECULIARITIES OF GEOPHYSICAL FIELDS UNDER MEGAPOLIS CONDITIONS

***D.N. Loktev, A.A. Spivak**, loctev@idg.chph.ras.ru, spivak@idg.chph.ras.ru*
Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences (IDG), Moscow, Russia

The results of synchronous registration of seismic oscillations, electric and acoustic fields under condition of Moscow city (Center of geophysical monitoring of IDG) are analyzed. General intervals of variations of the physical fields amplitudes under conditions of undisturbed and disturbed atmosphere were determined. Synchronism of variations of the physical field variations and change of the parameters characterized atmosphere is noted.

Крупные города – мегаполисы оказывают значительное воздействие на среду обитания человека [1,2]. Помимо изменении естественного ландшафта, гидрогеологического режима подземных вод и загрязнения среды пылью и химическими веществами в последнее время наблюдается повышенное воздействие мегаполиса на физические поля и, прежде всего на сейсмическое, электрическое и акустическое. Это повышает уровень негативного влияния мегаполиса на биосферу. Здесь следует отметить, что изучение физических полей в условиях мегаполиса представляет особый интерес не только для определения границ предельно допустимых техногенных нагрузок на среду обитания и живую природу, но также для установления причин и механизмов изменения окружающей среды и климата. При этом важной задачей является определение источников техногенного происхождения и мониторинг процессов, связанных с их воздействием на окружающую среду.

Геоэкологическое влияние мегаполиса характеризуется повышением сейсмического фона, возмущением электрического поля в приземном слое атмосферы и акустических шумов в широком диапазоне частот [3]. При этом уровень наведенных сейсмических колебаний, электрических полей и звуковых возмущений определяется суперпозицией процессов естественного происхождения, характерных для региона в целом, и производственной деятельностью.

Следует отметить, что последствия возмущений, например, естественного электрического поля атмосферы являются весьма ощутимыми. Помимо прямого влияния на геофизическую среду и организм человека [4,5] долговременные возмущения электрического поля, способствуют значительному ускорению электрохимических процессов, что важно учитывать при прогнозировании сроков эксплуатации открытых трубопроводных систем.

В связи со сказанным представляет значительный интерес организация и проведение постоянных и режимных инструментальных наблюдений с целью определения величины и характера возмущений, вносимых в геофизические поля мегаполисом как энергоемкой геофизической системой, установления основных источников техногенных воздействий.

С 2014 г. в Центре геофизического мониторинга г,Москвы ИДГ РАН [6] выполняются инструментальные наблюдения за сейсмическими колебаниями, электрическим полем и

акустическими колебаниями в приземной атмосфере (рис.1). Указанные наблюдения сопровождаются регистрацией метеорологических параметров атмосферы.

Рис.1. Схема Центра геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН

Одновременно выполняются наблюдения на удаленной от г. Москвы (~ 85 км), не подверженной влиянию мегаполиса Геофизической обсерватории "Михнево" ИДГ РАН (ГФО MHV).

Анализ результатов свидетельствует о существенном влиянии мегаполиса на амплитуду сейсмического шума. Среднеквадратическая амплитуда микросейсмических колебаний в г.Москве может достигать в отдельные периоды времени 12 – 15 мкм/с в то время как вне зоны влияния мегаполиса (ГФО MHV) она не превышает 0,5 мкм/с. Также наблюдаются существенные отличия в спектральных характеристиках сейсмического фона (рис.2).

Характеристики электрического поля в г.Москве и вне зоны ее влияния близки между собой и характеризуются сезонной изменчивостью. Так, например в летний период времени среднесуточные значения вертикальной компоненты напряженности электрического поля E в дни, характеризующиеся хорошей погодой (отсутствие плотной облачности, осадков, резких порывов ветра и т.д.), величина E изменяется в интервале 150 – 650 В/м (рис.3). В зимний период времени значения E при тех же погодных условиях не превышают 50 – 150 В/м.

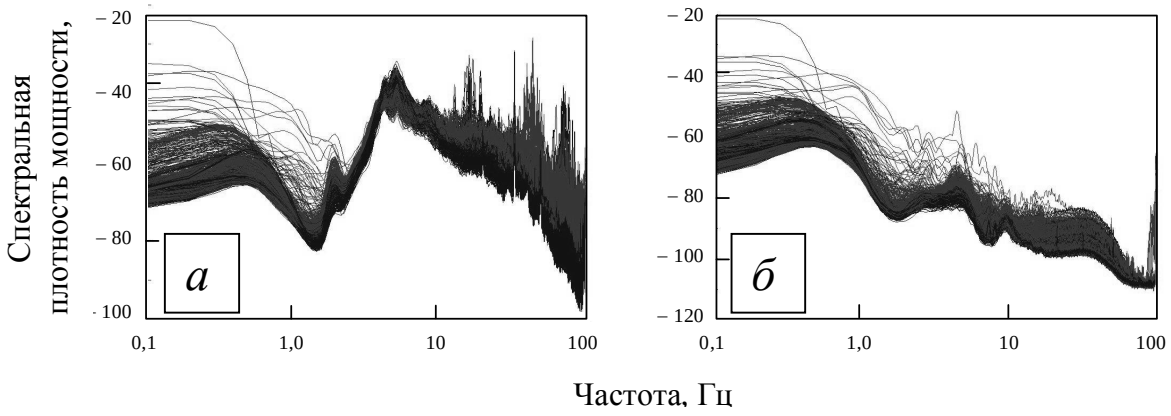


Рис.2. Спектральная плотность мощности сейсмического фона в г.Москве (*а*) и на ГФО "Михнево" ИДГ РАН (*б*) за июль 2014 г.

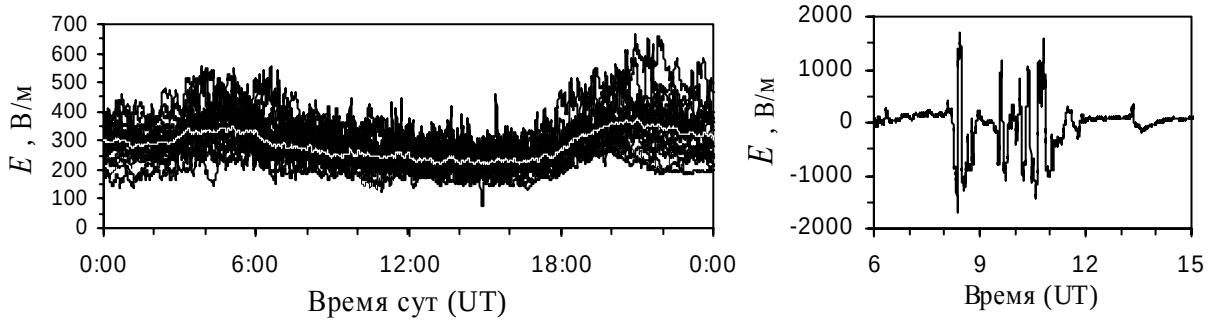


Рис.3. Слева - суточные вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля *E* в г.Москве за период 24.05 – 30.09 2014 г. в дни, характеризующиеся хорошей погодой (белая линия – вариация среднего значения *E*). Справа - пример возмущенной составляющей электрического поля 15.10.2014 г. во время грозы.

Величина возмущенной составляющей электрического поля (рис.3) в летний период времени (прохождение холодных атмосферных фронтов с грозовыми проявлениями, формирование плотной облачности) может достигать 6 – 8 кВ/м. В зимний период времени эта величина не превышает 500 – 800 В/м.

Акустические колебания проявляются в основном в дневное время. Их амплитуда в зависимости от параметров ветра достигает 5 – 10 Па. В периоды сильных возмущений атмосферы амплитуда акустических колебаний увеличивается до 20 – 30 Па в зависимости от мощности атмосферного фронта (рис.4), а в случае сильных грозовых явлений может достигать значений 100 – 120 Па. Мощные возмущения техногенного происхождения, например, праздничные салюты, могут вызывать увеличение амплитуды акустических колебаний до 40 – 500 Па в зависимости от расстояния до источника (рис.5).

Анализ данных свидетельствует о синхронности вариаций физических полей и параметров, характеризующих атмосферу. Пример такого рода синхронных вариаций всех измеряемых величин приведен на рис.6, из которого видно, что прохождение мощного холодного атмосферного фронта в период 9:45 – 10:20 UT, сопровождающегося практически скачкообразным изменением температуры воздуха *T* и атмосферного давления *P*, а также повышением влажности воздуха *W* и бухтообразным уменьшением солнечной радиации *S*, вызывает вариации не только амплитуды микропульсаций атмосферного давления *A*, но

также значимые вариации вертикальной составляющей напряженности электрического поля *E*. Более слабый холодный атмосферный фронт (~14:30 UT), сопровождающийся формированием плотной кучевой облачности без грозовых проявлений, также вызвал, хотя и менее выраженные, но практически синхронные вариации всех исследуемых полей.

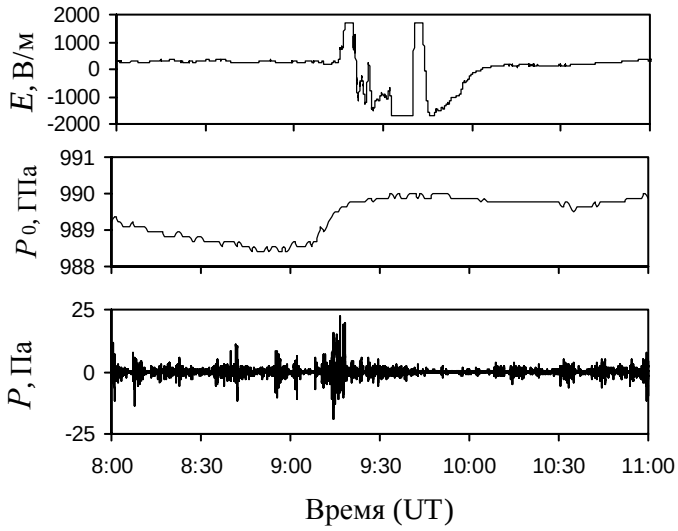


Рис. 4. Вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля в атмосфере *E* в период прохождения атмосферного фронта 27.05.2014 г.; P_0 – атмосферное давление, *P* – амплитуда акустических колебаний в диапазоне частот 0,05 – 100 Гц

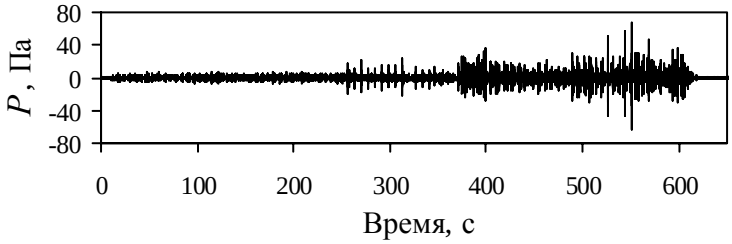


Рис.5. Акустические колебания *P* , вызванные праздничным салютом 09.05.2014 г. на расстоянии ~ 5 км от источника

Литература

1. *Адушкин В.В., Спивак А.А.* Мегаполис: проблема геофизических полей// Наука в России. 1995. № 5. С. 65 – 69.

2. *Осипов В.И.* Геологические условия градостроительного развития Москвы// геоэкология. 2006. № 2. С. 99 – 114. Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 2014. 360 с.

3. *Адушкин В.В., Спивак А.А.* Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 2014. 360 с.

4. *Электромагнитные* поля в биосфере. Т.1/ Под ре. Н.В. Красногорской. М.: Наука, 1984. 483 с.

5. Экология человека в изменяющемся мире/ Колл. авторов. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 570 с.

6. *Адушкин В.В., Спивак А.А.* Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 2014. 360 с.

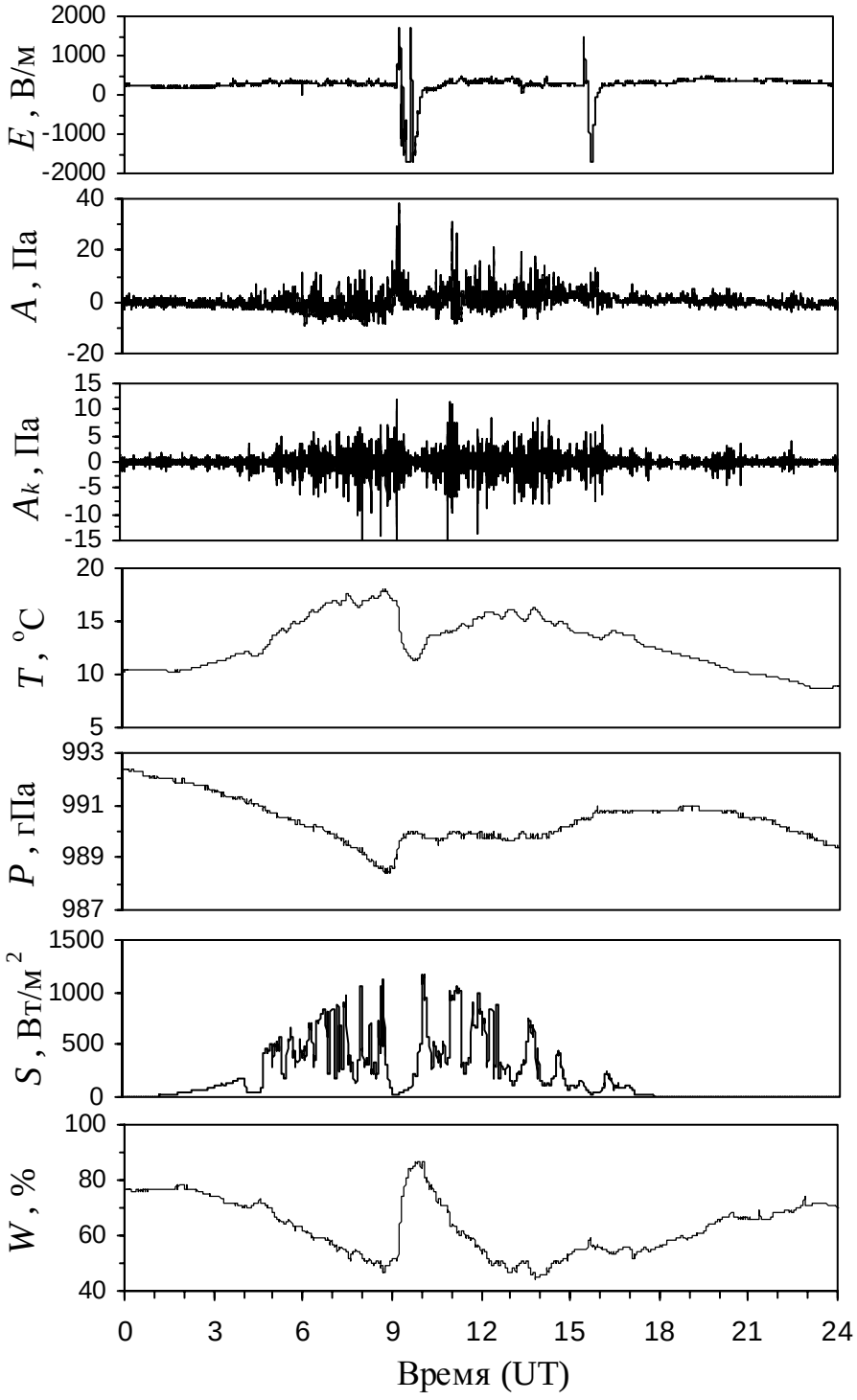


Рис.6. Пример синхронных вариаций геофизических полей
и метеорологических параметров атмосферы в г.Москве 17.06.2014 г.

УДК 550.834(265.5)

НОВОЕ В СТРОЕНИИ И ИСТОРИИ АБИССАЛЬНЫХ ХОЛМОВ СЗ ПЛИТЫ ПАЦИФИКИ

В.Л. Ломтев, *v.lomtev@imgg.ru*
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
V.L. Lomtev, *v.lomtev@imgg.ru*
Institute of marine geology and geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

В докладе обсуждаются строение и история формирования абиссальных холмов СЗ плиты Пацифики, которые считают подводными вулканами и/или лакколитами в основном юрско-мелового возраста [1, 2]. В основу работы положены результаты авторской интерпретации данных высокочастотного (120-150 Гц) НСП ИМГиГ, профиля МОГТ1 и бурения [3-7], а также атлас В.Н. Патрикеева [8].

Тектонические холмы. На профилях НСП и МОГТ1 они асимметричны, имеют широкое распространение на СЗ плите и связаны, в основном, с дивергентным гравитационным срывом слоев 1-4 (аллохтонная океаническая кора) в неогене-квартере [3, 4]. Так, на рис. 1 профиль МОГТ1 пересек моноклинальную надвиговую гряду высотой 1 км у восточного края вала Зенкевича. В подошву крутого передового склона гряды выходит сместитель чешуйчатого надвига, прослеженный до деколлемента в кровле слоя 5 (автохтон). Следовательно, гряда возникла при сползании слоев 1-4 (аллохтон). В [3] рис. 1 предлагают считать тектонотипом моноклинальных структур срыва, в том числе той, на вершине которой стоял г. Нефтегорск [9]. После 27(28) мая 1995 г. стало понятно, что строить его нужно было в тылу моноклинали. Замечу, что Оха также построена на моноклиналях, связанных с коровым срывом к востоку, только более низких (окончание регионального разлома).

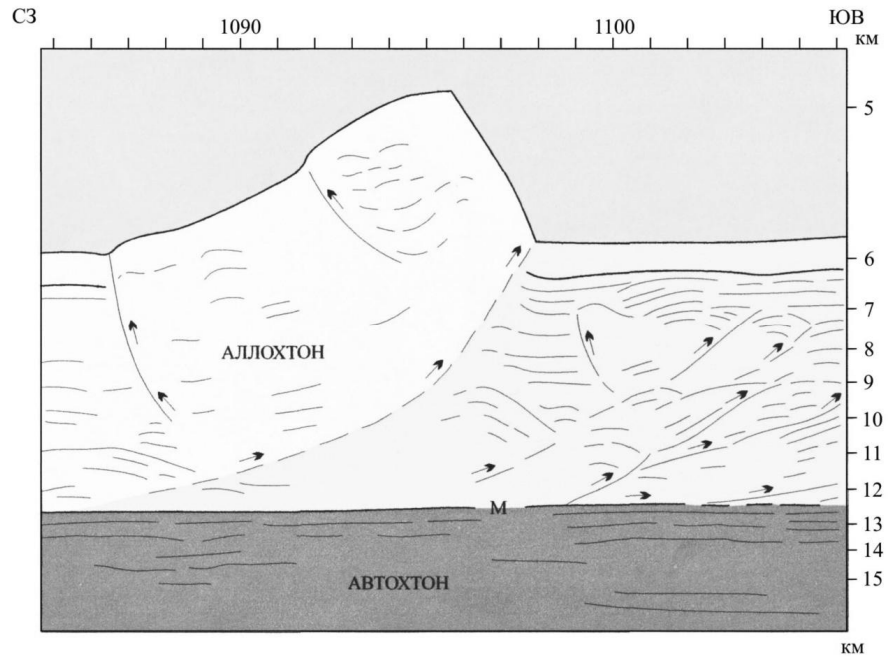


Рис. 1. Фрагмент глубинного разреза МОГТ 1 [4]. **M** – подошва аллохтонной океанической коры (деколлемент). Пунктиры со стрелками – разломы и смещения по ним. Прочие линии – дно и отражающие границы в аллохтоне и автохтоне.

Другой пример дает рис. 2 с фрагментом профиля НСП 1 (НИС «Морской геофизик»). На вершине вала Зенкевича между разломами Тускарора и Хоккайдо он пересек гряду небольших, частью асимметричных, абиссальных холмов высотой до 120 м и протяженностью 48 км. Холмы венчают смещенные (до 1.8 км) к северо-западу своды асимметричных сквозных антиклиналей в кайнозойском чехле и докайнозойском фундаменте. Асимметрия складок возникает за счет более крутых и коротких юго-восточных крыльев в сравнении с северо-западными (моноклинали). Их формирование связано с малоамплитудными пологими надвигами фундамента к юго-востоку и их вергентностью к северо-западу: от 2 во фронте до 4^{o} в тылу (складчато-надвиговый веер или структура типа «пальмового дерева», характерная для сдвигов со сжатием [10]). Высота складок с глубиной

заметно увеличивается, достигая ~500 м в кровле фундамента, что связано с конседиментационным режимом надвигания и повышенной мощностью гемипелагических (горизонт **D1**) и гемитерригенных (горизонт **D2**) осадков неоген-раннечетвертичного фана (конус выноса) среднекурильских каньонов на внешнем аккумулятивном подножии Японо-Курило-Камчатской окраины [6]. Такой режим развития структур срыва надежно фиксирует утонение осадков фана (особенно горизонта **D1**), к сводам тыловой и двух фронтальных складок. Кроме того, оно позволяет датировать складчато-надвиговый веер и гряду венчающих его низких абиссальных холмов средним миоценом-квартером.

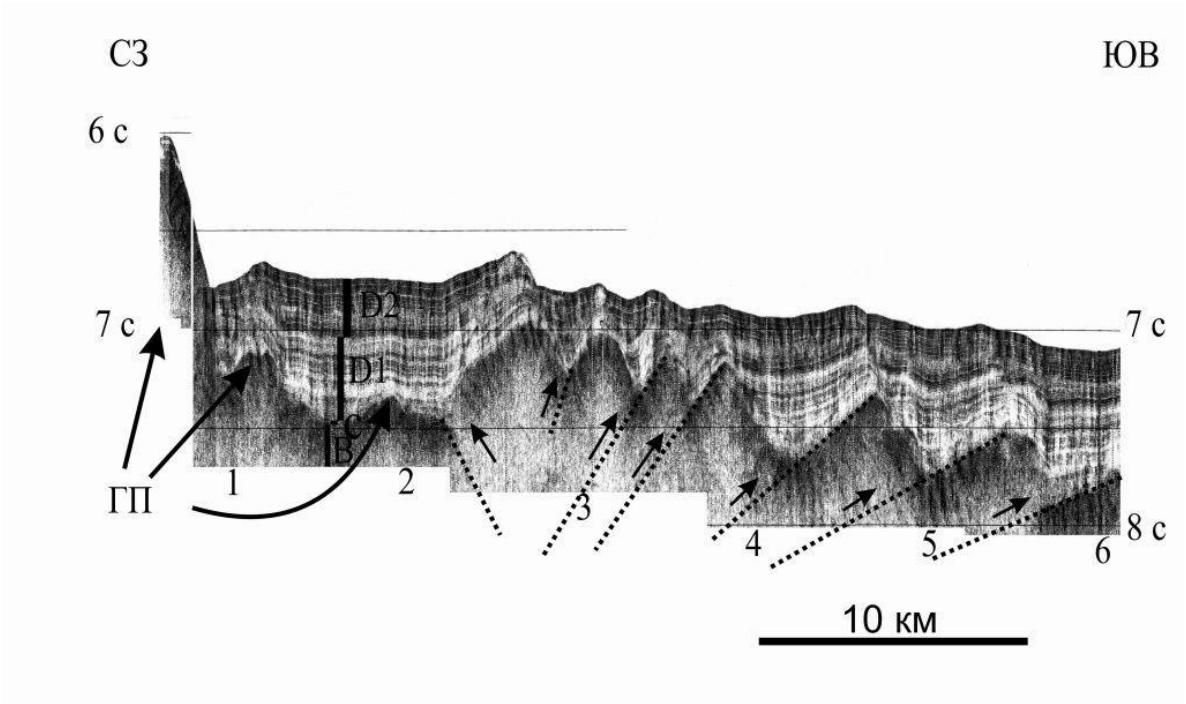


Рис. 2. Фрагмент профиля НСП 1. Его положение показано см. в [7, 8]. Вертикальный масштаб в секундах двойного пробега здесь и на рис. 3-5. Выделены получасовые марки времени здесь и рис. 3-5. Точки со стрелками – разломы и смещения по ним здесь и на рис. 3-5. **ГП** – вероятно гранитная протрузия из слоя 4 здесь и на рис. 4, 5. Стратиграфия видимого разреза в тексте и подписи к рис. 3.

Еще один пример можно видеть на профиле НСП 18 (НИС «Проф. Гагаринский») на юге котловины Тускарора. Здесь он пересек одиночный асимметричный холм высотой 320 м и шириной основания 11 км (рис. 3). Холм имеет выпуклые склоны и также является тектоническим выступом акустического фундамента, драпированным тонким (30-40 м) покровом позднекайнозойских гемипелагитов на вершине и северо-западном, пологом (~4^{o}) склоне. Через его подошву гемипелагиты протягиваются на прилегающую равнину ложа, где слагают верхнюю, придонную часть толщи **D**. И напротив, противоположный, короткий (2.4 км) и крутой (~8^{o}) склон этого холма обнажен (выход фундамента). Лишь его основание прикрыто маломощными русловыми гемипелагитами толщи **D**, слагающими небольшую абиссальную долину (моут?), обвалованную намывной дамбой. Столь разное строение позднемиоцен-четвертичного чехла на склонах одиночного холма и в его окрестности позволяет предполагать, что еще недавно здесь существовала невысокая абразионная (столовая) банка или выжатый по разломам блок поздний мел-раннекайнозойского пенеплена, выделенного в кровле толщи **B** [3]. Она контролировала положение абиссального русла и отложение гемипелагитов в позднем миоцене–начале-середине квартера, в том числе и на самой банке. Позднее банка была приподнята взбросом, вероятно унаследованным от предшествовавшей эпохи пенепленизации.

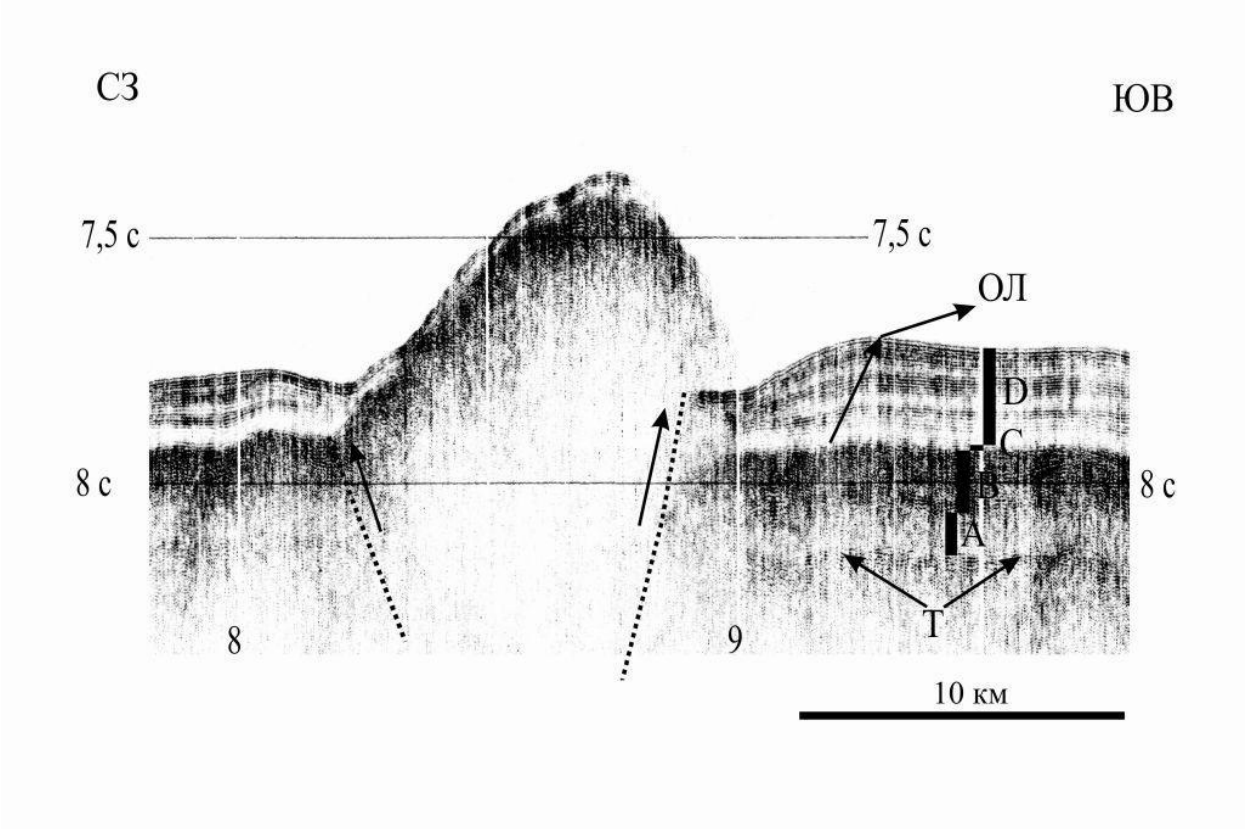


Рис. 3. Фрагмент профиля 18. Его положение см. в [8]. **ОЛ** - осадочная лопасть здесь и на рис.4; **T** - финальные траппы поздней юры-раннего мела; **A, B** – шельфовые и прибрежные фации позднего Тетиса соответственно; **C** - лессы палеосуши Пацифиды (палеоген-ранний миоцен); **D** - неоген-четвертичные осадки Камчатского мегафана [5-7].

Инъективные холмы. В отличие от асимметричных, тектонических холмов инъективные холмы СЗ плиты почти симметричны, имеют преимущественно коническое строение и также распространены довольно широко [3, 8]. Один из лучших примеров дает профиль 111 (НИС «Проф. Гагаринский»), пересекший цепь невысоких и почти симметричных абиссальных холмов на юго-западе котловины Тускарора близ одноименного разлома и края Сангарского фана (рис. 4). Последний определяется по угловому несогласию в подошве и резкому выклиниванию осадочной лопасти фана (намывная дамба канала Накве по Дж. Маммерикс [6]) на подножии смежной окраины вдоль границы Камчатского мегафана в котловине Тускарора и связанной с ним системы контурных течений к югу [5]. Высота холмов последовательно снижается к юго-востоку от 375 до 270, 153 и 105 м соответственно. Их диаметр основания не выдержан и варьирует от 6-7 до 12-13 км. Холмы образованы коническими выступами фундамента, пликативно деформирующими кайнозойский чехол, поэтому их следует считать инъективными структурами протыкания, связанными с бескорневыми гранитными протрузиями из слоя 4 [4]. Практически все они являются молодыми постседиментационными формами (квартер или его вторая половина).

Вместе с тем обратим внимание на самый высокий (535 м с учетом мощности толщи **D** на юго-восточном склоне) и крайний в цепи холм. Он имеет разнонаклонные склоны (левый ~4.5, правый ~15.5^{o}) с разными строением и мощностью позднекайнозойских гемипелагитов. К основанию его пологого склона прижаты абиссальное русло и край Сангарского фана, что указывает на недавно существовавшую здесь приподнятую структурную банку поздний мел-раннекайнозойского пенеплена (палеорельеф), контролировавшую гемипелагическую седиментацию на границе подножия курильской окраины и котловины Тускарора (конечный бассейн стока турбидитов [5, 6]). В квартере банка была приподнята по надвигу фундамента, который определил ее асимметрию

возможно аналогично структурной банке на рис. 3. Однако в отличие от нее здесь обратим внимание на почти симметричную шапку полупрозрачных гемипелагитов мощностью до 100 м, облекающую вершину и с утонением – склоны холма. Она как бы надстраивает толщу **D** на его правом склоне и выклинивается к подошве левого склона. В строении шапки выделим придонную слабоконтрастную пачку, которая уверенно прослеживается к юго-востоку в толще гемипелагитов (контуритов) мощностью 100-150 м. Следовательно, гемипелагиты шапки еще недавно были периферией Камчатского контурного мегафана, частью эродированной при образовании этого высокого холма.

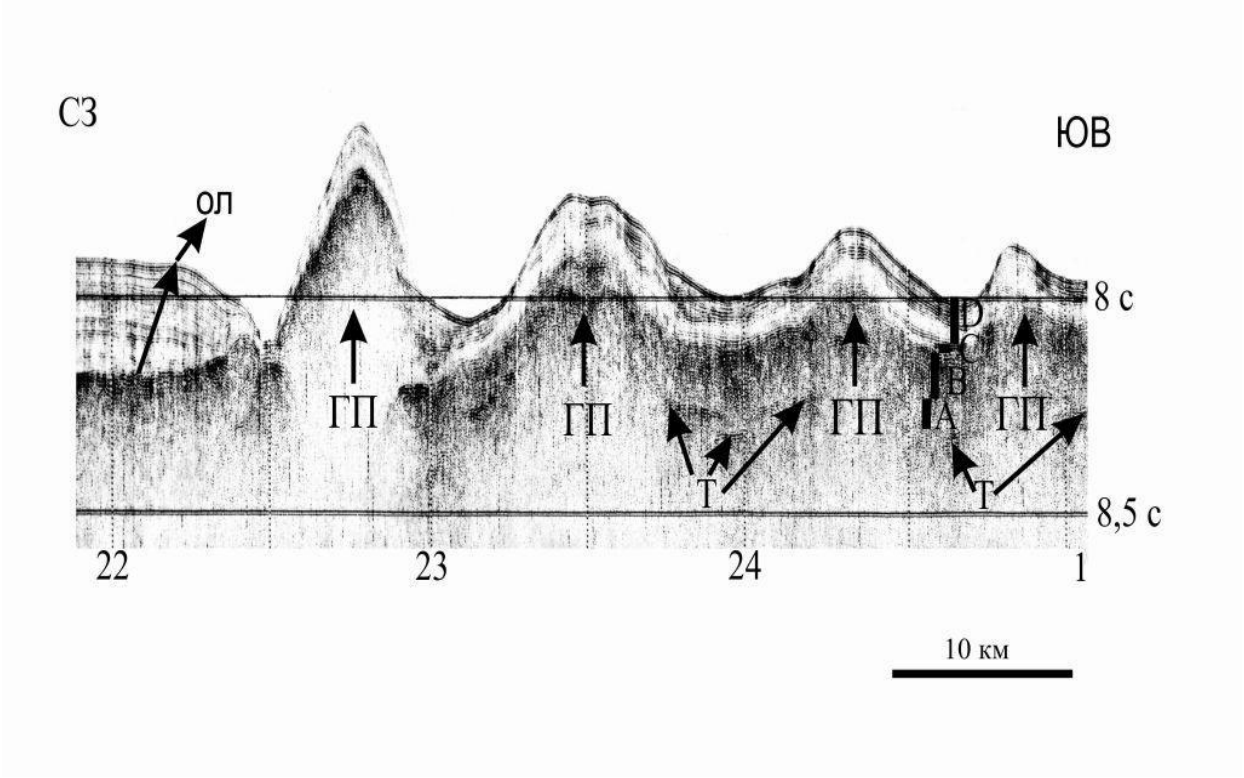


Рис. 4. Фрагмент профиля НСП 111. Его положение см. в [8], условные обозначения см. в подписи к рис. 2, 3.

Другой пример дает профиль НСП 4 (НИС «Морской геофизик»), пересекший часть инъективного абиссального холма близ подошвы западного склона поднятия Шатского. Его полуширина достигает 17.6 км при высоте ~550 м, включая нижнюю часть, погребенную под гемипелагитами толщи **D** мощностью 315 м (поздний миоцен-квартер). Его восточный склон выпукло-вогнутый и довольно пологий (~2^{o}). Уплощенная вершина и восточный склон холма драпированы маломощными (~40 м) лессами горизонта **C**, которые непрерывно прослежены на прилегающую аккумулятивную равнину ложа, где погребены под гемипелагитами толщи **D**. В нижней, погребенной части склона кровля горизонта **C** является поверхностью локального углового несогласия, связанного с горизонтальным налеганием гемипелагитов. Последнее надежно указывает на предпозднемиоценовый возраст холма (палеорельеф).

Вместе с тем отсутствие вершинного бенча говорит о подводных условиях его образования. Иначе говоря, этот холм вероятно возник в среднем миоцене после затопления поздний мел-раннекайнозойской палеосуши Пацифиды водами молодой Пацифики, но до начала отложения гемипелагитов в позднем миоцене при проградации осадочных лопастей Камчатского контурного мегафана к югу.

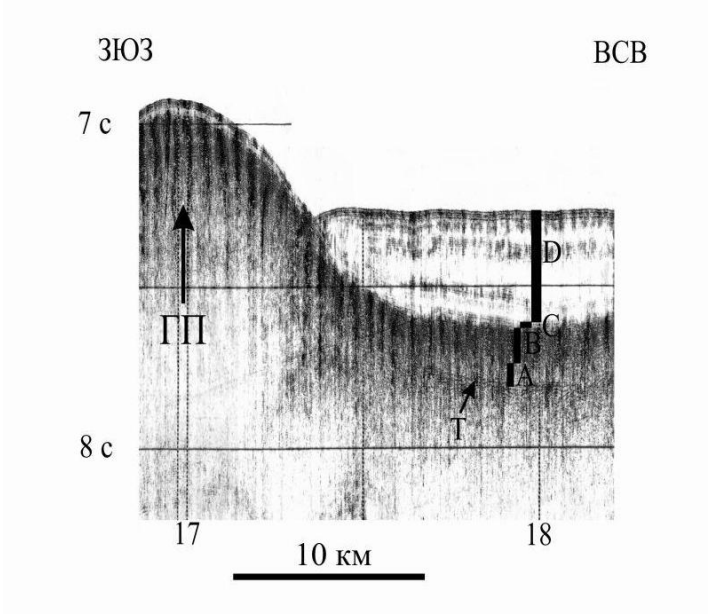


Рис. 5. Фрагмент профиля НСП 4. Его положение см. в [8]; условные обозначения – в подписи к рис. 2, 3.

Итак, среди абиссальных холмов СЗ плиты Пацифики по данным НСП и МОГТ вместо юрско-меловых вулканических конусов преобладают молодые асимметричные, тектонические и симметричные, инъективные формы без вершинных кратеров и контрастных, лаво-шлаковых потоков на склонах и прилегающей равнине ложа. Первые связаны в основном с гравитационным срывом слоев 1-4 (аллохтонная океаническая кора), вторые – с бескорневыми гранитными протрузиями из слоя 4. В последнем происходит гранитизация подтрапповых, первично-осадочных толщ раннего Тетиса, датируемых рифеем-палеозоем и вероятно связанная с теплом трения срыва [4]. Примеры тектонических и инъективных холмов, а нередко местами их комбинирование в плане, можно найти в [8]. Отметим также признаки унаследованного развития структурного плана СЗ плиты с позднего мезозоя-раннего кайнозоя, когда некоторые холмы возникли на месте структурных банок поздний мел-раннекайнозойского пенеплена (выступы акустического фундамента).

Список литературы

1. *Гершанович Д.Е., Леонтьев О.К.* Абиссальные холмы как генетический тип рельефа дна Мирового океана // Геоморфология. 1983. № 4. С. 14-22.
2. *Менард Г.У.* Геология дна Тихого океана. М.: Мир, 1966. 274 с.
3. *Ломтев В.Л.* Мезокайнозойский пенеплен в Северо-Западной Пацифике // Строение земной коры и перспективы нефтегазоносности в регионах Северо-Западной окраины Тихого океана. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2000. Т. 2. С.38-53.
4. *Ломтев В.Л.* К строению ложа Северо-Западной Пацифики // Уральский геофизический вестник. 2010. № 1. С. 21-32.
5. *Ломтев В.Л.* Признаки Пацифиды и Тетиса на ложе СЗ Пацифики // Ученые записки БрГУ. 2011. Вып. 7. Ч. 2. С. 110-122.
6. *Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н., Немченко Г.С.* Сейсмостратиграфия кайнозойского осадочного чехла Северо-Западной плиты Тихого океана // Структура и вещественный состав осадочного чехла Северо-Запада Тихого океана. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 21-41.
7. *Патрикеев В.Н., Ломтев В.Л., Немченко Г.С.* Сейсмостратиграфия мезозойского осадочного чехла Северо-Западной плиты Тихого океана // Там же, с. 5-20.
8. *Патрикеев В.Н.* Атлас сейсмических разрезов Северо-Западной плиты Тихого океана. М.: ГЕОС, 2009. 208 с.
9. *Ломтев В.Л., Жигулев В.В., Патрикеев В.Н., Агеев В.Н.* Проблемы геологии Северо-Сахалинского нефтегазоносного бассейна // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. Т. 2. С. 38-40.
10. *Кирмасов А.Б.* Основы структурного анализа. М.: Научный мир, 2011. 368 с.

УДК 550.834(265.5)

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ТЕКТОНИКЕ СЗ ПЛИТЫ ПАЦИФИКИ

В.Л. Ломтев, *v.lomtev@imgg.ru*
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
V.L. Lomtev, *v.lomtev@imgg.ru*
Institute of marine geology and geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

В последние годы в ИМГиГ ДВО РАН автором и к.г.-м.н. В.Н. Патрикеевым проводилась геологическая интерпретация данных высокочастотного (120-150 Гц) НСП МОВ, профиля МОГТ 1 и глубоководного бурения «Гломара Челленджера»на СЗ плите Пацифики [1-5 и др.]. Показано, что ее тектоническая структура в основном связана с гравитационным дивергентным срывом слоев 1-4 (тонкая океаническая кора) в неоген-квартере на склонах краевого вала и поднятий зоны разлома Хоккайдо. Срыв сопровождался расчешуиванием восточного и западного площадных аллохтонов (плит), бескорневыми гранитными протрузиями из слоя 4, формирующих многочисленные конические горы и холмы, повышенной мелкофокусной сейсмичностью (новая сейсмическая провинция Земли), газо- и возможно нефтеносностью мезокайнозойского, осадочно-траппового чехла (слои 1, 2) и продолжается до настоящего времени.

В платформенной стратиграфии СЗ плиты идентифицированы неоген-четвертичные регифации молодой Пацифики в слое 1 (толща **D** – осадки фанов каньонов на краевом валу как внешнем аккумулятивном подножии Японо-Курило-Камчатской континентальной окраины и Камчатского контурного мегафана в абиссальной котловине Тускарора, севере котловины Картографов и поднятия Шатского (конечный бассейн стока турбидитов). Отложения Пацифики подстилают пестрые абиогенные лессы (горизонт **C**) материковой палеосуши Пацифиды позднего мела-раннего миоцена. Ниже залегают прибрежно-морские осадки опакового слоя (толща **B**) и шельфовые карбонаты (толща **A**) поздней юры-раннего мела (поздний эпиконтинентальный Тетис). Траппы мезозоя в низах слоя 2 и высокоскоростном слое 3 (трапповая формация или провинция по Г.Ф. Макаренко) драпируют первично-осадочные, частью гранитизированные, толщи раннего Тетиса в слое 4 (палеозой-рифей [1, 3]). Вместе с тем данные НСП и бурения говорят о своеобразии геологического строения и истории развития периферии СЗ плиты (мелководный олигоцен на севере, окремнелые карбонаты позднего мезозоя на поднятии Шатского и др. [6, 7]). Ниже представлены новые примеры в тектонике периферии плиты (рис. 1-5).

Первый пример связан с конседиментационной моноклиналью на профиле НСП 19 (НИС «Проф. Гагаринский») на юго-западной окраине южного блока поднятия Шатского (рис. 1). Ширина моноклинали достигает 15 км, высота от 70 м в рельефе дна (холм, обтекаемый абиссальным руслом с намывной дамбой) до 300 м по кровле толщи **B** и 550 м по финальным траппам). У моноклинали пологий, северо-восточный склон и крутой, юго-западный, что согласно [1] указывает на смещение плиты к югу по скрытому надвигу. История моноклинали восходит к поздней юре-раннему мелу, что видно по утонению прозрачных карбонатов толщи **A** к ее своду. Позднее, во время формирования толщи **B** и горизонта **C** подвижки по разлому прекратились, поскольку их мощность на крыльях моноклинали выдержана. В неоген-четвертичное время подвижки возобновились, что видно по конседиментационному утонению контуритов толщи **D** (Камчатский контурный мегафан) к своду моноклинали. Итак, налицо унаследованное развитие скрытого надвига и связанной с ним конседиментационной моноклинали в позднем мезозое и позднем кайнозое. После заложения Японского и Курило-Камчатского желобов в среднем плейстоцене и перехвата русловых турбидитов по каньонам в отдельную проблему вырастает свежий геоморфологический облик абиссального русла и его намывной дамбы на рис.1 (придонные течения, связанные с топовихрем или абиссальными бурями при прохождении циклонов [3]).

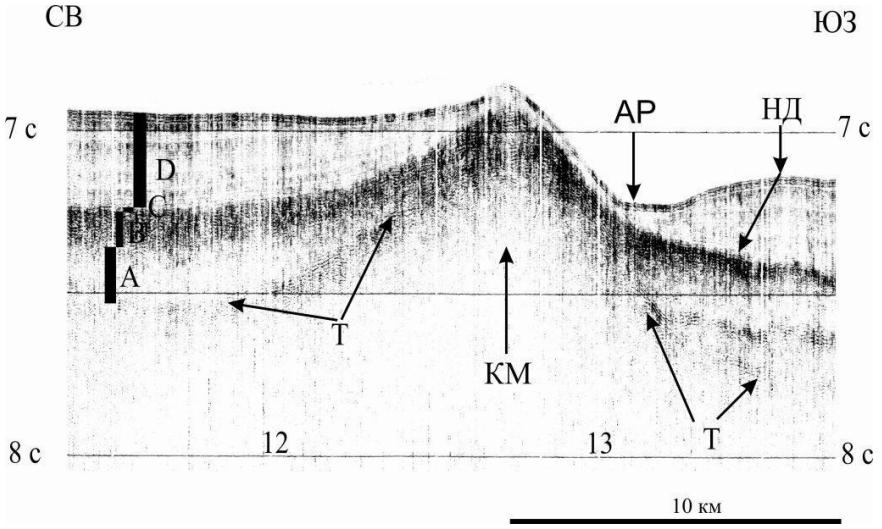


Рис. 1. Фрагмент профиля НСП 19. Его положение см. в [5]. Вертикальный масштаб в секундах двойного пробега; вертикальные линии - марки времени здесь и на рис. 2-5. Стратиграфия по [3-6] здесь и на рис. 2-5: **T** - финальные траппы поздней юры-раннего мела; **A** - шельфовые карбонаты поздней юры-раннего мела; **B** - опаковый слой пестрых кремней и глин конца раннего-позднего мела; **C** - пестрые субаэральные лессы палеогена-раннего миоцена; **D** – осадки Камчатского контурного мегафана (неоген-квартер); **КМ** - конседиментационная моноклиналь, **АР** - абиссальное русло, **НД** - намывная дамба.

Там же на юго-западной окраине южного блока поднятия Шатского профиль НСП 18 (НИС «Проф. Гагаринский») пересек разломную зону шириной 25 км (рис. 2). Финальные траппы и вышележащий мезокайнозойский разрез здесь подняты или выжаты на 0.1-0.4 с (до 200-400 м) над прилегающей равниной ложа. В структуре зоны выделим приподнятый осевой блок с уплощенной вершиной и рифовой шапкой (линза прозрачных надбазальтовых карбонатов) шириной 9 км. С обеих сторон блок ограничен надвигами, частью скрытыми. Так, разлом вдоль северо-западного края зоны маскирует молодой (квартер?) купол (вероятно гранитная протрузия), выраженный в рельефе дна симметричным абиссальным холмом высотой ~60 м. Интересно, что в опаковом слое купол уже асимметричен и его высота возрастает до ~200 м, что указывает на подвижки по краевому скрытому надвигу в кайнозое. Заложение разломной зоны произошло в конце поздней юры-раннем мелу после излияния финальных траппов. Позднее во время формирования толщи **B** и возможно горизонта **C** исследуемый район был немного (50-100 м) приподнят над прилегающей равниной ложа, на что указывает некоторое утонение первой к осевому блоку. В неогене-квартере налицо активизация разломов и подновление разломной зоны с выжиманием осевого блока и внедрением гранитов вдоль ее северо-западного края.

Итак, развитие структурного плана СЗ плиты в мезокайнозое здесь было также унаследованным.

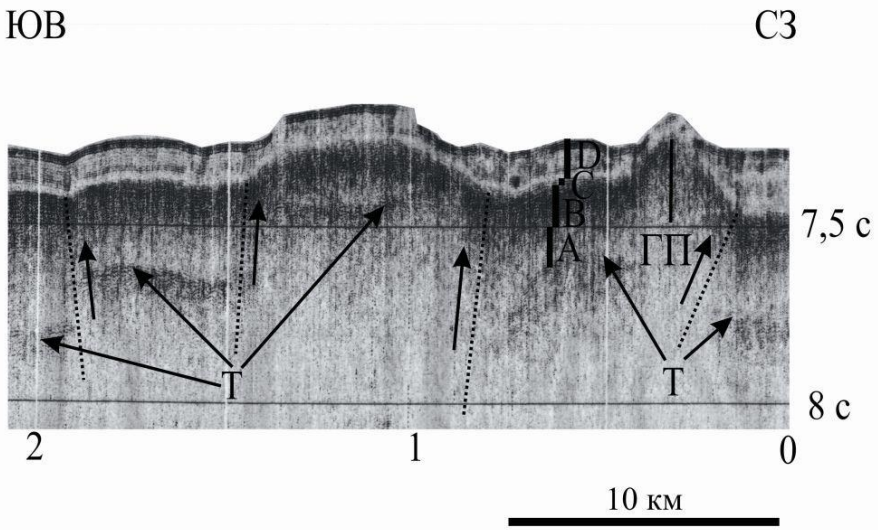


Рис. 2. Фрагмент профиля 18. Его положение см. в [5]. **ГП** – вероятно гранитная протрузияй; точки со стрелками – разломы и смещения по ним.

В третьем примере рассматривается небольшой фрагмент профилей НСП 28 и 29 (НИС «Проф. Гагаринский») на юго-западе котловины Тускарора в зоне одноименного регионального разлома (рис. 3). Последний протягивается к северо-западу до краевого вала и Курильского желоба [5, 7]. В исследуемом районе с небольшой депрессией шириной 24 км и глубиной 100 м обнаружены более десятка миниконусов высотой до 5-15 м и диаметром основания до 10-30 м, который за счет сейсмического сноса несколько завышен. На профилях НСП ИМГиГ по ложу СЗ Пацифики такие формы прежде не описывались [1-5, 7]. Геологическое строение дна здесь традиционное для котловины Тускароры [1-5], включая вертикальную «нарезку» мезокайнозойского чехла и связанную с миграцией газа [2]. Обсуждение возможной природы миниконусов, в том числе с д.г.-м.н. Н.С. Остапенко (ИГиП ДВО РАН, 16.09.2014 г.), позволяет предварительно отнести их к черным курильщикам, связывая с неглубокой (до ~1 км под дном) молодой интрузией по результатам моделирования Покровского силла в [8]. Этот вывод поддерживают данные по теплопотоку на рис. 5 в [7], где в ~300 км к северо-западу от исследуемого района выполнены две станции с заметно повышенными значениями 138.0 и 85.8 мВт/м^2 .

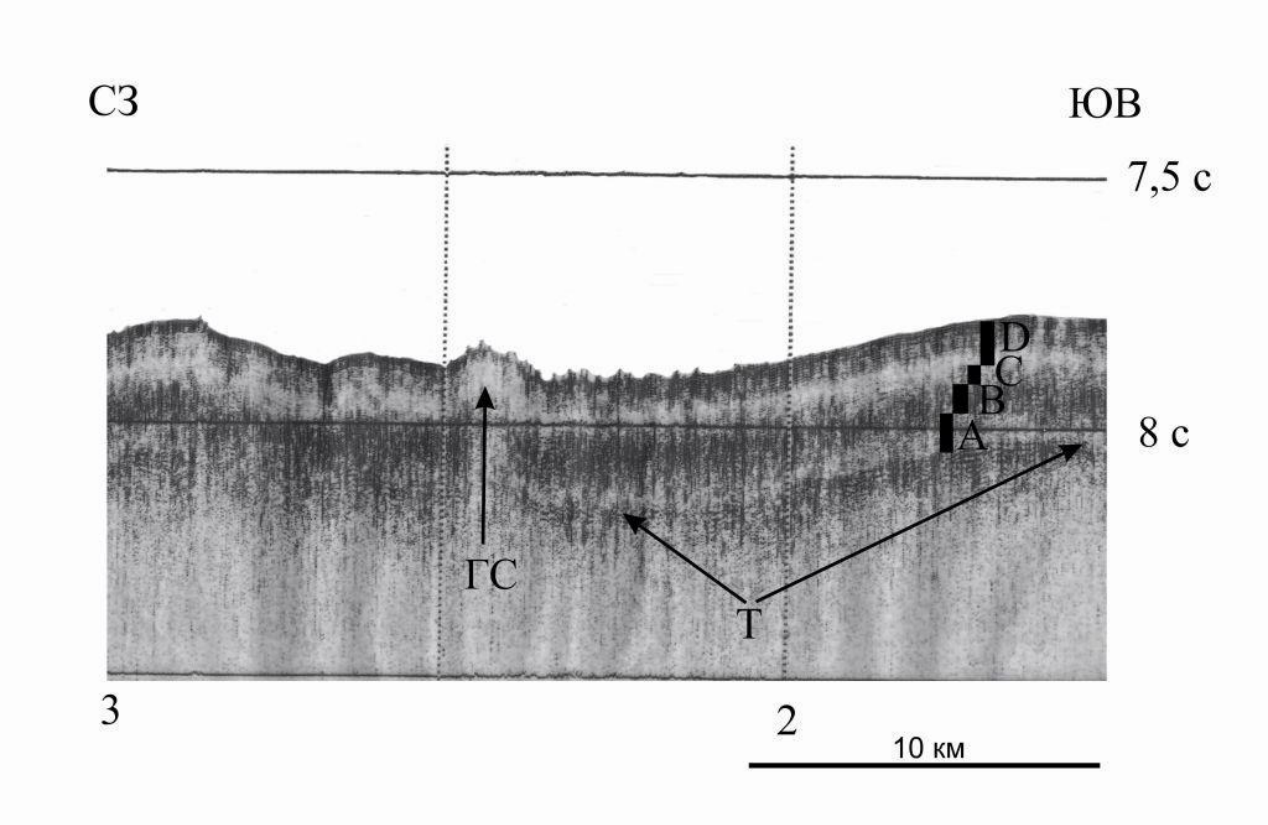


Рис. 3. Фрагменты профилей 28 и 29. Их положение см. в [5]. **ГС** - газовый столб [2].

Столь же необычен фрагмент профиля НСП 3 (НИС «Морской геофизик») в присводовой части подводного поднятия Шатского (рис. 4), поскольку он пересек небольшой холм с вершинным кратером глубиной 100 м. Холм возвышается над кровлей контрастного позднемезозойского осадочного чехла и имеет основание диаметром 6.5 км. Его склоны разновысотные (левый - 105 м, правый - 260 м) и отчасти разнонаклонные (левый ~7.5, правый ~6^o). С учетом нижней, погребенной под контрастными гемипелагитами толщи **D** части левого склона его крутизна может возрасти до 24^o. За счет сейсмического сноса и/или бокового отражения несколько увеличиться и крутизна правого склона, если за его подошву принять плоское дно промоины, а не основание осадочной лопасти. Тело холма контрастное, местами полупрозрачное с дифракциями и непротяженными, разнонаклонными отражающими площадками, в которых отсутствует нормальная осадочная расслоенность. Сходное строение наблюдается и в основании холма в полосе шириной ~5 км, где в контрастном позднемезозойском чехле прерывается пологонаклонная к юго-востоку

расслоенность. Из изложенного можно сделать предварительный вывод о взрывной природе этой постройки (газовулканический конус), сложенной преимущественно брекчией и глыбами подстилающего позднемезозойского чехла. Взрыв произошел под водой с небольшим разлетом обломков и мог быть вызван внедрением горячей интрузии в газовые пласты, залегающие среди известняков, частью окремнелых, и траппов позднего Тетиса [2, 3, 6]. Время взрыва и формирования холма можно наметить по особенностям строения толщи **D**, которая к северо-западу от него состоит из трех пачек. Мощность двух нижних пачек выдержана, в том числе вблизи холма, где они полого наклонены к юго-востоку. И напротив, верхняя, придонная пачка имеет переменную мощность с небольшим раздувом близ холма. При этом ее кровля полого поднимается к юго-востоку, а подошва в ту же сторону полого погружается, следуя наклону нижних пачек. Таким образом, время его образования можно датировать квартером.

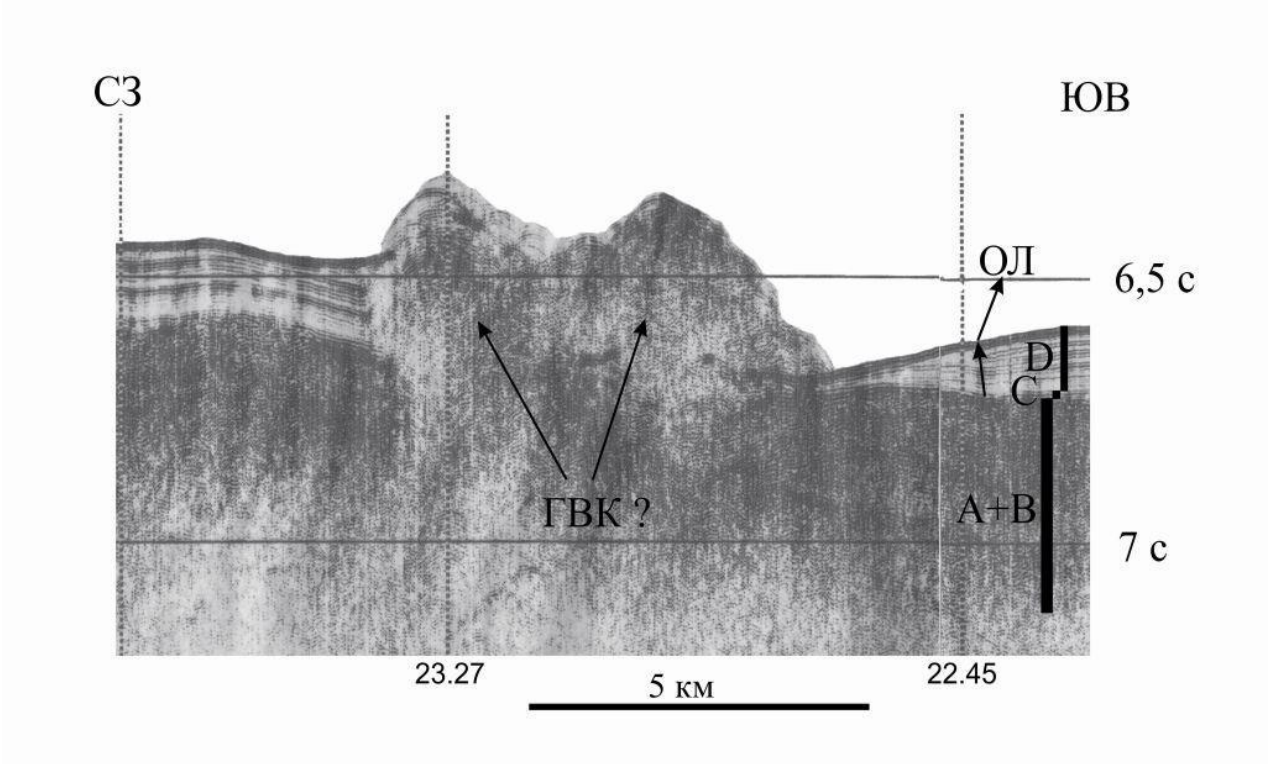


Рис. 4. Фрагмент профиля НСП 3. Его положение см. в [5]**. A+B** – контрастные, частью окремнелые, известняки позднего мезозоя; **ГВК** – газовулканический конус; **ОЛ** – осадочная лопасть.

Последний пример можно видеть на фрагменте профиля 6 (НИС «Морской геофизик») на севере котловины Тускарора (рис. 5). Здесь обнаружен необычный абиссальный холм шириной 23.5 км по основанию и разновысотными склонами. Так, высота его левого склона достигает 660 м, а правого – 330 м. Отметим также их разную крутизну (левый ~10^{o}, правый ~5^{o}), шероховатость и отсутствие кайнозойского чехла (горизонты **C** и **D**). К основанию правого склона примыкает наклонный ступенчатый цоколь, на котором мощность контрастных осадков толщи **D** сокращается вдвое. Субстрат тела холма, полупрозрачен, насыщен микродифракциями и в полосе шириной примерно 5 км «уходит» на глубину. Такое строение позволяет предполагать, что холм слагают брекчия и глыбы известняков толщи **A** (полупрозрачные на профилях НСП шельфовые карбонаты позднего Тетиса [3]), выдавленные при внедрении гранитной протрузии в квартере и частью газонасыщенные. Вместе с тем приподнятый цоколь правого склона и утонение придонных осадков на нем в сравнение с прилегающей равниной указывает, что на месте холма в неогене или даже ранее существовал тектонический выступ палеорельефа, активизированный в квартере при срыве слоев 1-4. Иначе говоря, этот абиссальный конус

имеет комбинированный, тектоно-инъективный генезис с элементами унаследованного развития по крайней мере с миоцена. В частности, брекчированность прозрачных известняков толщи **А** могла быть подготовлена подвижками по скрытому надвигу, с которым связаны асимметрия основания холма и подъем акустического фундамента под цоколем правого склона (висячее крыло разлома).

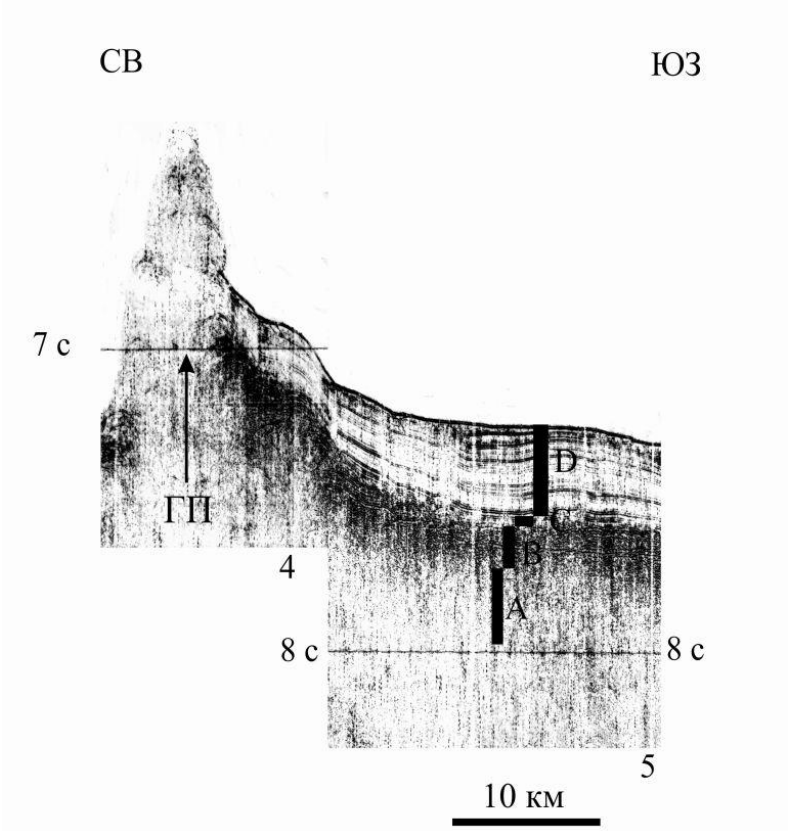


Рис. 5. Фрагмент профиля НСП 6. Его положение см. в [5].

Итак, представленные данные НСП ИМГиГ надежно фиксируют современную подвижность СЗ плиты, унаследованную местами с раннего кайнозоя-мезозоя. Формирование ее структурного плана было прерывистым, с остановками и накоплением осадочных толщ позднего эпиконтинентального Тетиса и молодой глубоководной Пацифики. Специального изучения требуют молодые гранитные протрузии, интрузии и газонефтеносность осадочно-траппового чехла плиты.

Список литературы

1. *Ломтев В.Л.* К строению ложа Северо-Западной Пацифики // Уральский геофизический вестник. 2010. № 1. С. 21–32.
2. *Ломтев В.Л.* Признаки газоносности мезокайнозойского чехла ложа Северо-Западной Пацифики // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2013. № 3. С. 11-17.
3. *Ломтев В.Л.* Признаки Пацифиды и Тетиса на ложе СЗ Пацифики // Ученые записки БрГУ. 2011. Вып. 7. Ч. 2. С. 110–122.
4. *Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н., Немченко Г.С.* Сейсмостратиграфия кайнозойского осадочного чехла Северо-Западной плиты Тихого океана // Структура и вещественный состав осадочного чехла Северо-Запада Тихого океана. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 21-41.
5. *Патрикеев В.Н.* Атлас сейсмических разрезов Северо-Западной плиты Тихого океана. М.: ГЕОС, 2009. 208 с.
6. *Рудич Е.М.* Расширяющиеся океаны: факты и гипотезы. М.: Недра, 1984. 251 с.
7. *Гнибиденко Г.С., Аносов Г.И., Аргентов В.В. и др.* Тектоника северо-западной части Тихого океана. М.: Наука, 1983.118 с.
8. *Остапенко Н.С., Нерода О.Н., Бородавкин С.И.* Экспериментальное моделирование конвекции рудообразующего флюида над внедрившимся в гидротермальную систему магматическим силлом (ситуация С-В фланга Покровского месторождения) // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: Третья Всерос. науч. конф. Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2014. Т. 1. С. 150-153.

УДК 550.36 + 551.16

О БАРИЧЕСКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ЖЕЛЕЗА И ПРИРОДЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛА

М.Н. Магомедов, *mahmag4@mail.ru*
ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала, Россия, 367030, пр-т Шамиля 39-а

Аннотация. Рассчитаны зависимости удельной поверхностной энергии (σ) и коэффициента самодиффузии в железе от относительного объема (V/V_0). Оценены значения V/V_0 и давления, при которых реализуется условие фрагментации: $\sigma < 0$. Показано, что наблюдающиеся на разделе Гутенберга эффекты и природу гетермального тепла можно объяснить переходом кристалла в дисперсное текучее состояние из-за барической экзотермической фрагментации железа.

ON THE BARIC FRAGMENTATION OF IRON AND A NATURE OF GEOTHERMAL HEAT

M.N. Magomedov, *mahmag4@mail.ru*
FSBES Institute for Geothermal Research of Daghestan Scientific Centre of RAS, Makhachkala, Russia, 367030, Chamilia str. 39-a

Abstract. The dependencies of specific surface energy (σ) and the self-diffusion coefficient into the iron versus of the relative volume (V/V_0) are calculated. It was evaluated the values of V/V_0 and pressures, under which is realized the fragmentation condition: $\sigma < 0$. It is shown that the observing into Gutenberg's boundary effects and a nature of geothermal heat can be explained by the transition of crystal to the dispersing state by of the exothermal fragmentation of the iron.

Известно, что строение Земли имеет неоднородный с глубиной характер. Исходя из модели Земли Р. Хаддона и К. Буллена, на глубине 2900 км (раздел Гутенберга) наблюдается резкое увеличение плотности, рост электропроводности с одновременным падением скорости сейсмических волн и вязкости вещества. Данные эффекты (в особенности исчезновение поперечной составляющей скорости сейсмических волн) привело к заключению, что внешнее ядро Земли (находящееся на глубине от 2900 до 5000 км) находится в жидком состоянии [1, 2]. При этом внутреннее ядро Земли, состоящее из тех же веществ (в основном это железо и никель) оказывается в твердом состоянии. Возникают вопросы: какова природа жидкоподобного поведения внешнего ядра Земли, и почему внутреннее ядро, находящееся при более высоких температурах, остается в твердой фазе?

Известно так же, что возникновение геотермального тепла нельзя в полной мере объяснить только лишь распадом радиоактивных изотопов калия, урана, тория и др. [3, 4]. Поэтому вопрос о возникновении тепла Земли так же остается открытым. Исходя из результатов полученных нами в работах [5-8], можно предположить, что одним из источников геотермального тепла является процесс экзотермического диспергирования кристаллов под давлением. Этим же барическим диспергированием вещества можно объяснить и наблюдающиеся на разделе Гутенберга эффекты (резкое увеличение плотности с одновременным падением скорости сейсмических волн и вязкости вещества). Обоснованию этой гипотезы и посвящена данная работа.

Используемые ныне различные критерии разрушения вещества и формирования поверхностей раздела при сжатии либо растяжении кристалла содержат в своем формализме такие параметры как удельная (на единицу площади) поверхностная энергия (σ) и коэффициент самодиффузии (D_f). Причем, если функцию σ используют при прогнозе условий образования трещины, то функцию D_f – для изучения кинетики развития трещины при различных давлениях (P) и температурах (T). Очевидно, что функции σ и D_f зависят от P-T-аргументов, однако в большинстве случаев используют значения функций σ и D_f , полученные при невысоких температурах и при $P = 0$. Это связано с тем, что

экспериментальных данных для σ и D_f при высоких *P*-*T*-условиях нет, а теоретические прогнозы используют в своем формализме различные подгоночные параметры, поведение которых при высоких *P*-*T*-условиях трудно предсказать. Поэтому нами разработана аналитическая методика, описывающая с единых позиций зависимость функций σ и D_f как от температуры, так и от V/V_0 – относительного объема кристалла. Под «едиными позициями» здесь подразумевается, что в формализм модели не входит никаких подгоночных констант кроме параметров межатомного потенциала, массы атома и структуры кристалла. Здесь V/V_0 – отношение объемов при *P* и *T*, и при *P* = 0 и *T* = 0 K.

Разработанная нами методика подробно описана в [6-8]. Как показано в [6], данный метод позволяет хорошо описать функции $\sigma(V/V_0, T)$ и $D_f(V/V_0,T)$ при сжатии или растяжении кристалла, как при высоких, так и при низких температурах. Поэтому эту методику мы использовали для расчетов свойств железа при *P*-*T*-параметрах, присущих ядру Земли.

Представим парное межатомное взаимодействие в виде потенциала Ми–Леннарда–Джонса, имеющего вид [6, гл. 3]:

$$\varphi(r) = \frac{D}{(b-a)}\left[a\left(\frac{r_o}{r}\right)^b - b\left(\frac{r_o}{r}\right)^a\right], \qquad (1)$$

где *D* и r_o – глубина и координата минимума потенциала, *b* и *a* – параметры: $b > a > 1$.

Для проведения расчетов возьмем железо (*m* = 55.847 а.е.м.) с объемно центрированной кубической (ОЦК) структурой. ОЦК структура выбрана потому, что при высоких *P*-*T*-условиях железо переходит в β-фазу, структура которой рыхлее, чем гранецентрированная кубическая (ГЦК) структура γ-фазы или гексагональная плотно упакованная (ГПУ) структура ε-фазы. Параметры тройной точки между этими фазами (γ-ε-β), согласно работе [9], равны: *P* = 37 ГПа = 370 кбар и *T* = 1550 K.

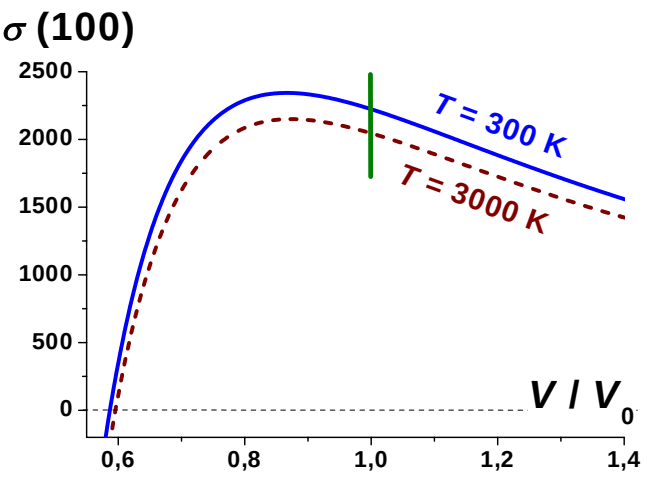
Параметры парного межатомного потенциала Ми-Леннарда-Джонса (1) для железа, определенные самосогласованным методом в [6], равны:

$$r_o = 2.4775\times10^{-10}\ \text{м}, \qquad D/k_B = 12576.7\ \text{K}, \qquad a = 3.58, \qquad b = 8.26. \qquad (2)$$

Тогда значение нормального объема для нашей модели будет равно: $V_0 = N\,(\pi/6\,k_p)\,r_o^3 = 7.0494$ см^3/моль, где k_p – коэффициент упаковки структуры: k_p(ОЦК) = 0.6802.

В **таблице 1** представлены результаты расчетов: ϕ_v – вероятности образования вакансии, D_f – коэффициента самодиффузии (в см^2/с) и σ – удельной поверхностной энергии (в 10^{-3} Дж/м^2) грани (100) ОЦК-Fe при $V/V_0 = 1$ (т.е. при $P \cong 0$) для температур 300 и 3000 K.

T, K	$-\lg(\phi_v)$	$-\lg(D_f/[\text{см}^2/\text{с}])$	$\sigma(100)$, $[10^{-3}$ Дж/м$^2]$
300	38.083	59.579	2223.16
3000	4.867	8.545	2045.43



Оценки других авторов при *P* =0 и температурах близких к плавлению Fe (T_m=1810 K) равны [6]: $-\lg(\phi_v) = 2.43 \div 3$, $-\lg(D_f/[\text{см}^2/\text{с}]) = 7.1 \div 8.7$, $\sigma(100) = 1720 \div 2480$ $[10^{-3}$ Дж/м$^2]$.

Как видно, согласие рассчитанных значений с экспериментальными вполне хорошее.

На **рис. 1** показаны изотермические зависимости функции σ(100) (в 10^{-3} Дж/м^2) от аргумента V/V_0 вдоль изотерм 300 и 3000 K. Вертикаль показывает область разброса экспериментальных данных для σ(100) при $P \cong 0$. Функция $\sigma(V/V_0)$ достигает максимума при небольших сжатиях $(V/V_0)_{max}$, после чего резко уменьшается, переходя при $(V/V_0)_{fr}$ в область отрицательных значений. Из рис. 1 видно, что с ростом

температуры условие фрагментации ($\sigma \le 0$) достигаются при меньших степенях сжатия.

При сжатиях в области $V/V_0 < (V/V_0)_{fr}$ кристаллу энергетически выгодно любым путем увеличить свою удельную (на атом) поверхность: либо свободную, либо межкристаллитную, ибо здесь $\sigma \le 0$. Флуктуационно отделившийся от кристалла и образовавший поверхность (свободную или межкристаллитную) домен в таких условиях будет испытывать дополнительное «поверхностное» давление [6, 7], которое тем больше, чем меньше размер домена. Это «поверхностное» давление еще более сожмет флуктуационно отделившийся домен, что приведёт к самосжатию образующихся при фрагментации доменов, и к освобождению некоторого пространства между ними. Образующееся при этом «дисперсное» состояние вещества будет текучим, подобно жидкой фазе: оно примет форму сосуда, в котором находится. Вязкость «дисперсного» состояния будет тем меньше, чем больше сжимающее давление и чем меньше размер доменов.

Таким образом, при $V/V_0 < (V/V_0)_{fr}$ реализуется экзотермический процесс фрагментации кристалла, который приводит к росту плотности образующихся доменов, к уменьшению вязкости образующейся «дисперсной» среды, и к генерации тепла. Размерная зависимость функции σ, размерное сжатие, и барическая теплогенерация для ОЦК-Fe были изучены нами в работе [7].

В **таблице 2** представлены координаты точки максимума: $(V/V_0)_{max}$, и $(V/V_0)_{fr}$ – точки фрагментации, где $\sigma = 0$ на изотермах зависимости $\sigma(V/V_0)$ из рис. 1.

T K	$(V/V_0)_{max}$	σ_{max} 10^{-3} Дж/м^2	P_ε [9] кбар	P_γ [9] кбар	P_β [10] кбар	$(V/V_0)_{fr}$	$P_{\varepsilon\ fr}$ [9] Мбар	$P_{\gamma\ fr}$ [9] Мбар	$P_{\beta\ fr}$ [10] Мбар
300	0.866	2343.54	341.9	324.1	262.5	0.587	4.18	3.09	2.85
3000	0.874	2150.11	312.2	297.4	393.2	0.595	3.89	2.91	2.87

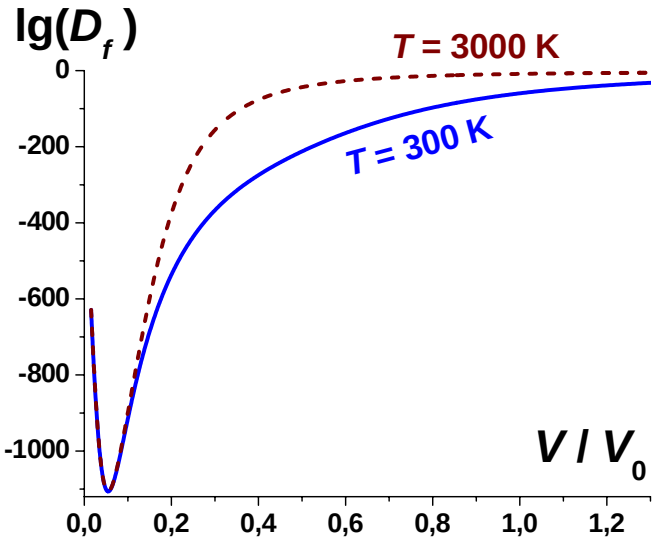
В табл. 2 указаны также соответствующие данным точкам давления, рассчитанные по экспериментальной зависимости для «холодной» (упругой) составляющей давления, взятые из обзора [9]: $P_x = \rho_0 C_0^2 [(V/V_0)^{-n} - 1] / n$. Здесь для различных фаз железа использованы следующие параметры:

для ГПУ-ε-Fe (полученные до 2.5 Мбар): $\rho_0 = 8.3$ г/см^3, $C_0 = 4.444$ км/с, $n = 4.88$,

для ГЦК-γ-Fe (полученные до 0.4 Мбар): $\rho_0 = 7.98$ г/см^3, $C_0 = 4.57$ км/с, $n = 4.0$.

Для ОЦК-Fe мы использовали зависимости $P(V/V_0, T)$, полученные в работе [10] методом молекулярной динамики для $T = 0$ K и 3000 K (табл. 2 из [10]).

На **рис. 2** показана зависимость $\lg(D_f / [\text{см}^2/\text{с}])$ от V/V_0 вдоль изотерм 300 и 3000 K. Как видно при всестороннем сжатии коэффициент самодиффузии уменьшается, причем при $V/V_0 \to 0.1$ зависимость от температуры исчезает. Это объясняется квантовым эффектом: при $V/V_0 \to 0.1$ межатомное расстояние становится сравнимым с амплитудой колебаний атомов, что приводит к туннельному переносу атомов по объему кристалла.



При фрагментации возрастает роль межкристаллитной самодиффузии. Поэтому результаты для изотерм $D_f(V/V_0)$ из рис. 2 справедливы только в области: $V/V_0 > (V/V_0)_{fr}$. Отклонение измеренной при $V/V_0 < (V/V_0)_{fr}$ изотермической зависимости $D_f(V/V_0)$ от полученной здесь зависимости для железа можно использовать как для индикации барической фрагментации кристалла, так и для оценки роли межкристаллитной самодиффузии по «дисперсной» текучей среде.

Исходя из эффекта барической фрагментации (т.е. $\sigma \leq 0$), нами была выдвинута гипотеза, согласно которой наблюдающиеся на границе нижней мантии и верхнего ядра Земли (D″ слой на глубине от 2700 до 2900 км, где $P \geq 1.4$ Мбар и $T \geq 3500$ K) эффекты (резкое увеличение плотности, рост электропроводности с одновременным падением скорости сейсмических волн и вязкости вещества) можно объяснить переходом вещества в «дисперсное» текучее состояние при высоких *P*-*T*-условиях [6, 7]. Именно барическим диспергированием вещества можно объяснить как жидкоподобное поведение вещества во внешнем ядре Земли (на глубине от 2890 до 5150 км, где $1.33 < P < 3.3$ Мбар и $3500 < T < 6300$ K), так и природу геотермального тепла (которое нельзя объяснить только лишь распадом радиоактивных изотопов K, U, Th и др.). Как видно из табл. 2, значения *P*-*T*-параметров для реализации барической экзотермической фрагментации вполне достижимы во внешнем ядре Земли, которое содержит не менее 94 % Fe.

Отметим, что на «неустойчивость» кристалла железа при высоких давлениях было указано также в работе [11]. Но вместо межатомного потенциала Ми-Леннарда-Джонса (1) там использовали межатомный потенциал Ридберга. Для давлений присущих ядру Земли и при $T = 0$ K в [11] была оценена величина относительного объема железа, начиная с которого кристалл становится «неустойчивым»: $(V/V_0) \leq 0.576$. Это достаточно близко к величинам, полученным нами.

Учитывая, что внутреннее ядро Земли вращается быстрее, чем мантия [1, 2], можно полагать, что вещество внешнего ядра испытывает за счет этого дополнительное динамическое давление, перемалывающее вещество в мелкодисперсное состояние. Такое перемалывание должно сопровождаться экзотермическим эффектом, что и объясняет возникновение геотермального тепла. Оценки количества тепла, выделяющегося при барической фрагментации железа при различных *P*-*T*-условиях, сделаны нами в работе [7].

Но почему же в рамках данной модели барической фрагментации остается твердым (т.е. не текучим) внутреннее ядро Земли? Ответ на этот вопрос кроется в динамике движения внутреннего ядра. И в первую очередь речь здесь идет о смещении внутреннего ядра как целого под действием приливных сил Луны. По оценкам различных авторов [12, 13] это смещение может достигать нескольких сотен метров. Легко понять, что данное смещение сопровождается сжатием вещества вдоль вектора силы притяжения и соответствующим растяжением вещества в противоположном (от центра Земли) направлении. Это сжатие, как было показано выше, должно приводить к фрагментации вещества и переходу его в текучее нанодисперсное состояние. Но при растяжении сжатого вещества оно опять переходит в твердое монолитное состояние. Именно эта смена сжатия вещества на его растяжение (из-за действия на вещество в центре ядра приливных сил) и приводит к существованию в центре Земли твердого внутреннего ядра. Это происходит из-за существования в центре Земли области давлений, где $P < P_{fr}$ и стабильно «монолитное» состояние, которое «плавает» в нанодисперсной текучей фазе. При этом на полюсах, через которые проходит ось вращения «монолитного», а потому и твердого внутреннего ядра, толщина внешнего жидкого ядра должна быть меньше. Вдоль оси вращения твердого внутреннего ядра давление должно быть минимальным.

Перед вулканологами давно стоит вопрос: почему «проснувшийся» вулкан, выбросив при огромном давлении и температуре определенную дозу вещества, снова «успокаивается»? Ведь по физическим законам, если мантия и кора раскалываются до «расплава» внешнего ядра, где вещество находится при огромном давлении, то через этот вулкан должен был вылететь весь «расплав» внешнего ядра, до выравнивания давления в ядре до атмосферного. **Почему же вулкан «закрывается» выбросив определенную дозу вещества?** С точки зрения предложенной нанодисперсной модели текучего внешнего ядра можно ответить следующее. Полученное барической фрагментацией «дисперсное» состояние (стабильное при $P > P_{fr}$) вырвавшись на поверхность (где $P < P_{fr}$) будет метастабильным. Поэтому при $P < P_{fr}$ «дисперсное» состояние переходит в «монолитное» с выделением энергии. При этом «монолитное» состояние будет «закупоривать» все трещины, куда проникла текучая дисперсная фаза. Выбросив определенную дозу расплава, и сбросив, таким образом,

давление до $P < P_{fr}$ вулкан «закупорится» веществом в «монолитном» состоянии. Так как внутреннее давление минимально вдоль оси вращения твердого внутреннего ядра, то вулканическая активность и генерируемый тепловой поток на полюсах будут минимальны.

Вопрос о структуре ядра Земли до сих пор не решен [14]. Более того, все существующие модели ядра не могут ответить на основополагающие вопросы: почему внутреннее ядро твердое, в то время как менее нагретое внешнее ядро «жидкое»? Почему плотность внешнего жидкого ядра на 10 % ниже по сравнению с плотностью расплава железа [15]? Предложенная нанодисперсная модель внешнего ядра в состоянии ответить как на поставленные вопросы о структуре и свойствах ядра, так и на вопрос о генерации теплового потока из недр Земли.

Выводы

1. Показано, что при высоких *P-T*-условиях должен наблюдаться экзотермический процесс диспергирования кристалла, который с одной стороны приводит к резкому росту плотности образующихся нанокристаллов, а с другой – к резкому уменьшению вязкости образовавшейся диспергированной среды.
2. Оценены значения объема железа необходимые для реализации экзотермической барической фрагментации: $(V/V_0)_{fr}$ = 0.6 – 0.59. Показано, что они вполне реальны для условий на разделе Гуттенберга: P = 135 – 150 ГПа и T = 4000 K.
3. Наблюдающиеся на разделе Гутенберга эффекты можно объяснить переходом макрокристаллического вещества в дисперсное нанокристаллическое состояние под влиянием сильного всестороннего давления и высокой температуры.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН (проект № 13П).

Список литературы

1. *Жарков В.Н., Трубицын В.П.* Физика планетарных недр. М.: Наука, 1980. 448 с.
2. *Орленок В.В.* Основы геофизики. Калининград: Изд-во КГУ, 2000. 446 с.
3. *Смыслов А.А., Моисеенко У.Н., Чадович Т.З.* Тепловой режим и радиоактивность Земли. М.: Недра, 1978. 192 с.
4. *Магомедов К.М.* Теоретические основы геотермии. М.: Наука, 2001. 277 с. (гл. III)
5. *Магомедов М.Н.* О барической фрагментации кристалла // Физика Твердого Тела. 2003. Т. 45, № 5. С. 907 – 909.
6. *Магомедов М.Н.* Изучение межатомного взаимодействия, образования вакансий и самодиффузии в кристаллах. М.: Физматлит, 2010. 544 с.
7. *Магомедов М.Н.* О поверхностных свойствах и барической фрагментации железа // Поверхность. Рентген., синхротр., и нейтрон. исслед. 2012. № 5. С. 59 – 71.
8. *Магомедов М.Н.* О самодиффузии и поверхностной энергии при сжатии или растяжении кристалла железа // Журнал Технической Физики. 2013. Т. 83, № 3. С. 71 – 78.
9. *Фунтиков А.И.* Фазовая диаграмма и кривая плавления железа, полученные по данным статических и ударно-волновых измерений // Теплофизика Высоких Температур. 2003. Т. 41, № 6. С. 954 – 969.
10. *Белащенко Д.К., Островский О.И.* // Молекулярнодинамическое моделирование ударного сжатия металлов. // Журнал Физической Химии. 2011. Т. 85, № 6. С. 1063 – 1073.
11. *Shanker J., Singh B.P.* Compression Limit for Iron Based on Seismological Data // Physica B. 2005. V. 364, № 1-4. P. 186 – 189.
12. *Авсюк Ю.Н.* Приливные силы и природные процессы. М.: Изд-во ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.
13. *Чуйкова Н.А., Казарян С.А., Пасынок С.Л.* Учет внутреннего гравитационного и магнитного полей в анализе полярных колебаний внутреннего ядра Земли // Вестник МГУ. Серия 3. Физика и астрономия. 1997. № 2. С. 40 – 43.
14. *Молоденский С.М.* Коррективы в схему строения Земли по новым данным о приливах, нутации и собственных колебаниях // Физика Земли. 2010. № 7. С. 3 – 28.
15. *Пущаровский Д.Ю., Оганов А.Р.* Структурные перестройки минералов в глубинных оболочках Земли // Кристаллография. 2006. Т. 51, № 5. С. 819 – 829.

УДК 551.248.2 (470.1/.25)

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ЗОНЫ В НОВЕЙШЕЙ СТРУКТУРЕ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

***Н.В. Макарова*[1]** *(makarovanat@yandex.ru),* ***В.М. Макеев*[2]** *(vmakeev@mail.ru),*
***А.Л. Дорожко*[2], *Т.В. Суханова*[1], *И.В. Коробова*[2]**
[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), геологический ф-т. Москва, Россия*
[2.]*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия*

Рассматриваются условия формирования новейших структур Восточно-Европейской платформы. В противоположность существующим представлениям о преимущественно блоковом строении новейших форм, отражающих структуры фундамента, развивается представление о существенной роли изгибных деформаций в строении новейших поднятий и прогибов. Большое значение при этом имеют латеральные процессы передачи напряжений от активных источников. К последним относятся активные области, находящиеся вне платформы. Это коллизионные орогены Кавказа, Карпат, а также Урала, спрединговая или рифтовая область Атлантического океана. Внутриплатформенными источниками напряжений являются крупные сводовые поднятия Воронежское, Токмовское и др., а также прогибы Окско-Донской, Днепровско-Донецкий и др. Выделены геодинамические системы разных рангов, включающие активные области или источники напряжений и сопряженные с ними территории, на которые распространяется действие этих источников, отраженное в морфологии и строении новейших деформаций. Границами между системами являются зоны структурных несогласий или геодинамически активные зоны. Последние различаются рангом, морфологией, геодинамическим типом, глубиной заложения, возрастом, современной активностью. Приведены характеристики некоторых геодинамически активных зон. Новейшие структуры платформ формируются под действием различных источников сил.

GEODYNAMIC SYSTEMS AND GEODYNAMIC ACTIVE ZONES IN EAST-EUROPEAN PLATFORM NEWEST STRUCTURE

***N.V. Makarova*[1]** *(makarovanat@yandex.ru),* ***V.M. Makeev*[2]** *(vmakeev@mail.ru),*
***A.L. Dorozhko*[2], *T.V. Sukhanova*[1], *I.V. Korobova*[2]**
[1]*Lomonosov Moscow State University (MSU), faculty of Geology, Moscow, Russia*
[2]*Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS (IEG RAS), Moscow, Russia*

The conditions of East-European platform newest structures forming are considered. As opposed to the existing ideas about the mainly blocked newest forms structure, which reflects crystalline basement structure, the conception of the essential role of the plicated deformations in newest structure of depressions and uplifts is developed. The lateral processes of the stresses transmission from the active sources have great importance. These sources are the active areas, situated outside the platform. They are the collision orogens of the Caucasus, Carpathians and so Ural, spreading and rift areas of the Atlantic Ocean. The intra-platform stress sources are large arc uplifts, such as Voronezhsky, Tokmovsky, at alias, and so depressions, such as Oksko-Donskoy, Dneprovo-Donetsky and others. The geodynamic systems of different ranks were allocated. They include active areas ore intra-platform stress sources and conjugate territories, which are under the influence of these stress sources, and it is reflected in the morphology and structure of the newest deformations. Boundaries of the systems are the structure discordance zones (geodynamic active zones). The last differ by rank, morphology, geodynamic type, depth, age, modern activity. The characteristics of some geodynamic active zones are given. Platform newest structures are formed under the influence of different stress resources.

Динамическое воздействие на платформы прилегающих к ним подвижных областей – коллизионных, субдукционных, спрединговых, рифтовых и др. в настоящее время признается многими российскими исследователями. Представления А.П. Карпинского о единстве геологического развития Восточно-Европейской платформы с окружающими горно-складчатыми областями Урала и Кавказа были развиты и дополнены А.П. Павловым, Д.И. Мушкетовым, М.М. Тетяевым, А.Д. Архангельским, Е.В. Милановским, Н.С. Шатским,

В.Е. Хаиным, Ю.М. Пущаровским и др., а позднее Е.Е. Милановским, М.Л. Коппом, Ю. Г. Леоновым, Ю.К. Щукиным, В.И. Макаровым, Л.А. Сим и др. Проблеме связи внутриплитного геодинамического режима с глобальными процессами на границах плит посвящено большое количество работ иностранных авторов.

Ю.К. Щукиным [1] и В.И. Макаровым [2] разработана концепция **новейших геодинамических систем**, направленная на изучение происхождения и механизма формирования платформенных неотектонических структур. В новейшие геодинамические системы (ГС) ими включены тектонически активные области – источники тектонических сил и напряжений – и сопряженные с ними территории, на которые распространяется воздействие активных областей. Оно проявлено не только распределением осей сжатия и растяжения, выявленных по трещиноватости пород, замерам в горных выработках, сейсмологическим данным, но и строением новейших структур, их морфологией, ориентировкой и совокупностью других признаков, позволяющих связывать формирование структур с тем или иным источником напряжений.

Геодинамические системы (ГС) Восточно-Европейской платформ (ВЕП) подразделяются на связанные с *внеплатформенными* (глобальными) и *внутриплатформенными* (региональными и локальными) источниками напряжений (рис. 1). К первым относятся Альпийская, Скандинавская и Уральская ГС. Источники их напряжений находятся по окраинам платформы и обусловлены процессами, происходящими на границах плит. Это орогены Кавказа, Карпат, Урала. Самостоятельными активными глубинными источниками напряжений являются впадины Черного и Каспийского морей. Их влияние, ослабляющее или блокирующее влияние Альпийской и Уральской ГС, распространяется на большие расстояния.

Внутриплатформенные источники тектонических сил и напряжений являются как самостоятельными, не зависящими от процессов, происходящих на границах плит, так и производными этих процессов. В них напряжения и деформации вызваны структурно-вещественными преобразованиями, происходящими на разных глубинных уровнях, и силами гравитации. Это структуры разного ранга, как длительно развивающиеся крупные сводовые поднятия (Воронежское, Токмовское и многие другие) и прогибы (Окско-Донской, Днепровско-Донецкий и др.), так и менее крупные структуры. Развитие как тех, так и других, в свою очередь, вызывает формирование структур еще более высокого ранга. При этом внутриплатформенные региональные глубинные процессы и латеральные процессы от внешних глобальных источников, по всей вероятности, действуют одновременно. Вследствие этого возможна их интерференция при формировании структурных форм (СФ), отраженная в строении и морфологии последних. Поэтому предполагается, что новейшие СФ платформы формируются под воздействием нескольких источников сил, и на разных стадиях новейшего этапа степень воздействия того или иного источника может меняться. Признается значительная дальность воздействия (более 1000 км) различных источников на земную кору платформы, но механизм передачи напряжений находится в стадии дискуссии. Новейшие ГС, связанные с глобальными источниками напряжений, занимают громадные площади. Они вмещают ГС меньшего ранга, связанные с внутренними источниками сил. Границами ГС являются зоны их сопряжения, динамического взаимодействия и интерференции. Они были названы геодинамически активными зонами (ГдАЗ) [5, 6]**.** Границы многих разноранговых ГС, особенно в северных районах платформы, в настоящее время не достаточно четко определены из-за слабой изученности в них СФ.

Геодинамически активные зоны (ГдАЗ) представляют собой пространственно локализованные линейные или изометричные объемы (участки) земной коры разного масштаба, в которых в силу различных причин имеются или могут возникать условия для концентрации и разрядки тектонических напряжений и повышенных градиентов движений. Практически - это **зоны структурных несогласий**, которые разграничивают или в которых сопрягаются новейшие структуры, формирующиеся под воздействием различных источников напряжений и сил. Как правило, это границы неоднородных геолого-

геофизических сред между собой, характеризующиеся многими аномальными особенностями, часто **сейсмичностью.** При этом ГдАЗ не отождествляются с разломами и линеаментами, а являются более сложными образованиями, в которых разрывные нарушения могут являться лишь одной из их составляющих.

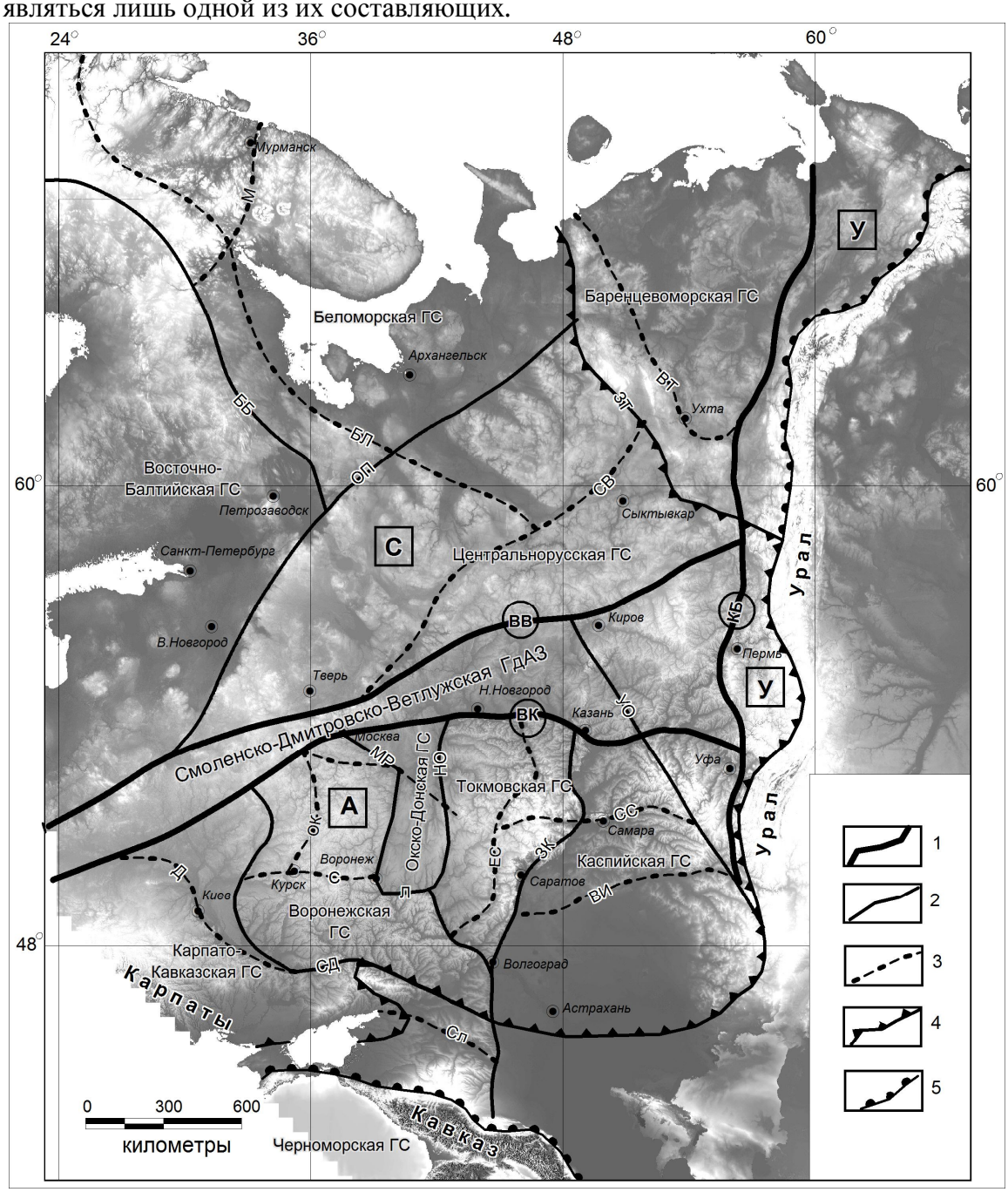


Рис. 1. **Новейшие геодинамические системы (ГС) и геодинамически активные зоны (ГдАЗ) Восточно-Европейской платформ** (предварительная схема). ГС, связанные с влиянием глобальных источников напряжений: А – Альпийская, С – Скандинавская, У – Уральская. ГдАЗ, являющиеся границами ГС: 1 – глобальных (ВВ – Верхневолжско-Вятская, ВК - Волжско-Камская, КБ – Камско-Бельская), 2 – региональных (СД – Северско-Донецкая, НО – Нижнеокская, УО – Уржум-Оренбургская, ЗК – Западно-Каспийская, Л – Лискинская, ББ – Беломорско-Балтийская, ОП – Онежско-Пудожская, ЗТ- Западно-Тиманская, ВТ – Восточно-Тиманская. 3 – внутрисистемных разного ранга: С- Сеймская, ОК – Окско-Курская, Д – Деснинская, Сл – Сальская, ЕС– Ергенинско-Сурская, СС – Сызрань-Самарская, СВ – Сухоно-Вычегодская, БЛ – Беломорская, М – Мурманская. Границы: 4 – Восточно-Европейской платформы, 5 – Уральского и Кавказского орогенов.

Соответственно рангу ГС, на границах которых они образуются, ГдАЗ также имеют различный ранг. От этого различны их **протяженность, ширина, возраст и время развития, глубина заложения.** Крупнейшие ГдАЗ I ранга разделяют ГС, образование которых вызвано глобальными процессами. Это Смоленско-Дмитровско-Ветлужская, Уржум-Оренбургская (Восточно-Каспийская) и Западно-Каспийская зоны, являющиеся результатом интерференции давлений, исходящих от активных областей: для первой зоны от Фенноскандинавской, а для двух других - от Каспийской и Альпийской.

К ГдАЗ II ранга относятся внутриплатформенные зоны новейших деформаций, развивающиеся на границах крупных неоднородностей ВЕП. Это Нижнеокская, разграничивающая структуры северо-западного крыла Токмовского свода и Окско-Цнинского вала, Северско-Донецкая, развивающаяся на границе структур ВЕП и Скифской плиты и многие др. ГдАЗ III и более высоких порядков образуются в условиях концентрации напряжений на границах взаимодействия менее крупных платформенных структур (Сальская, Манычская и многие др.).

В современном рельефе ГдАЗ выражены преимущественно **отрицательными** формами - впадинами-прогибами, эрозионно-тектоническими речными долинами, реже положительными формами – валами, или сочетанием этих форм, а также уступами, часто отражающими флексурно-разрывные образования чехла, проявленные зонами крупных линеаментов. Некоторые из ГдАЗ имеют относительно простое, другие более сложное внутреннее геологическое и тектоническое строение.

Кинематический тип ГдАЗ различен. Разделяя территории с разными геодинамическими условиями или обстановками, в ГдАЗ могут реализовываться сжимающие или растягивающие напряжения, сопровождающиеся сдвиговыми напряжениями. Так МосквоРецкоРязанская зона характеризуется предполагаемыми напряжениями растяжения с правосдвиговой компонентой, Нижнеокская – с напряжениями сжатия с левосдвиговой компонентой [7], Западно-Каспийская – с деформациями растяжения с левосдвиговой компонентой [8].

Соотношение со структурами фундамента и разновозрастными горизонтами чехла определяется объемом геологической среды, вовлеченным в деформации или зоны повышенной концентрации напряжений. Многие ГдАЗ развиваются над структурами фундамента, не согласуясь с ними ни по форме, ни по простиранию (Сеймская, Сальская и др.), другие согласны с ними (Западно-Каспийская, Нижнеокская и др.).

Возраст ГдАЗ. Все они являются новейшими, т.е. олигоцен-миоцен-четвертичными, как и ГС, с которыми они связаны. Но возраст некоторых превышает рамки новейшего этапа. Например, Нижнеокская ГдАЗ представляет собой прогиб, существующий с позднего протерозоя с некоторыми перерывами, Лосевская шовная зона, разделяющая структуры восточного склона новейшего Воронежского поднятия и Окско-Донского прогиба, существует на протяжении всей геологической истории. Некоторые ГдАЗ четвертичные или плиоцен-четвертичные (Сальская, Манычская и др.).

Современная активность ГдАЗ оценивается по выраженности в рельефе, амплитудам и градиентам новейших тектонических движений, особенно голоценовых и современных, включая разрывообразование, миграции зон в процессе их развития, сейсмичности, присутствию различных геологических и геоморфологических признаков современного проявления вертикальных и горизонтальных движений, напряжений сжатия или растяжения и их отражению в современном рельефе, фациях отложений, геохимических аномалиях, горных ударах, активности экзогенных процессов (эрозия, оползание и обваливание, карстообразование и многие др.).

Границы ГдАЗ часто являются условными, выделяемыми лишь по ряду признаков. Миграция зон в ту или другую сторону не позволяет считать их границы разломными, хотя многие исследователи прямолинейность таких границ объясняют именно разломами, даже, если они не подтверждены геологической съемкой.

Развитие представлений о влиянии процессов, происходящих на границах литосферных плит, на внутриплатформенные (внутриплитные) напряжения и геодинамику позволяет по-новому рассматривать геодинамические условия формирования новейших структур в разных частях платформы. Районирование территории ВЕП по геодинамическим системам может быть основой для сейсмического районирования. ГдАЗ имеют инженерно-геологическое и экологическое значение, поскольку с ними связаны эндогенные и экзогенные процессы. Необходимо дальнейшее изучение ГдАЗ, особенно в северных областях платформы.

Список литературы

1. Щукин Ю.К. Глубинная сейсмотектоника Северной Евразии // Недра Поволжья и Прикаспия. Спец. выпуск. № 13. 1996. С. 6-11.
2. Макаров В.И. Региональные особенности новейшей геодинамики платформенных территорий в связи с оценкой их сейсмической активности // Там же. С.53-60.
3. Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 300 с.
4. Новейшая тектоника и геодинамика. Область сочленения Вост.-Европ. платформы и Скифской плиты [Макаров В.И., Макарова Н.В., Несмеянов С.А. и др.]. М.: Наука, 2006. 206 с.
5. Макаров В.И., Макарова Н.В. Новейшие геодинамические активные зоны Восточно-Европейской платформы // Тектоника и геодинамика континентальной литосферы: Мат-лы тектонич. совещ. М, 2003. Т. 2. С. 16-19.
6. Макаров В.И., Дорожко А.Л., Макарова Н.В., Макеев В.М. Геодинамически активные зоны платформ // Геоэкология. Инж. геология. Гидрогеология. Геокриология. 2007. № 2. С. 99-110.
7. Макарова Н.В., Макеев В.М., Суханова Т.В., Дорожко А.Л., Коробова И.И. Новейшая тектоника юго-западного крыла Воронежской антеклизы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. №. 2. С. 19-20.
8. Копп М.Л. Мобилисткая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2004. 340 с. (Тр. ГИН РАН. Вып. 552).

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРЁХМЕРНЫХ ПЛОТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

П.С. Мартышко, И.В. Ладовский, Д.Д. Бызов
Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН

Аннотация. В настоящей работе изложена методика построения плотностных моделей по данным высокоточной гравиметрии и комплексу геофизических данных. Методика основана на оригинальных методах и алгоритмах интерпретации геофизических данных, разработанных в Институте геофизики УрО РАН. Методика была применена для построения плотностной модели земной коры и верхней мантии территории Тимано-Печерской плиты, интерпретации гравитационных данных на ряде нефтяных месторождений.

METHODS AND ALGORITHMS FOR 3D DENSITY MODEL CONSTRUCTION BASED ON GRAVITY AND SEISMIC DATA INTERPRETATION

P.S. Martyshko, I.L. Ladovskiy, D.D. Byzov
Bulashevich Institute of Geophysics

Annotaion. This paper presents methods for density model construction using gravity and complex geophysical data. Method based on original algorithms of geophysical data interpretation devised at Institute of Geophysics UB RAS. Methods was applied for Earth crust model construction of Timan-Pechora plate.

При поисках, разведке и на стадии эксплуатации месторождений возникает задача определения плотностных характеристик изучаемой среды. Для восстановления трехмерного распределения плотности на глубине с использованием устойчивых решений обратной задачи гравиметрии требуются цифровые данные гравитационного поля, точность которых достаточна для воспроизведения необходимых деталей объекта исследований, и верхняя и нижняя границы слоя, в рамках которого ищется решение. Если задача малоглубинная, а перспективный участок имеет площадь порядка 1000 км^2, то мы имеем дело с высокоточной задачей гравитационного моделирования. Для решения «нефтяных задач» необходимы данные микрогравиметрической съемки и высокоточная карта рельефа исследуемой территории. Для вычисления поправки за рельеф необходима средняя плотность приведения. Желательно также иметь менее детальные данные о рельефе за пределами исследуемого участка.

Как показывают исследования геологических структур, существенный вклад в гравитационное поле исследуемого слоя могут оказывать источники, залегающие вне его. В частности, это источники, находящиеся вне рассматриваемой области в проекции на земную поверхность (боковые источники), а также источники, залегающие на глубинах меньше и больше рассматриваемой. Для уменьшения влияния таких источников нами разработан следующий метод.

Исключение боковых источников поля. Производится решение двумерной задачи Дирихле (краевыми условиями для задачи Дирихле являются значения поля на краях исследуемой области). Затем найденное решение задачи Дирихле вычитается из исходных значений поля. Как известно, гармоническая в области функция может иметь экстремум разве что на границе этой области. Поэтому следует ожидать, что экстремумы от боковых источников поля будут «заложены» в найденной гармонической функции, и, таким образом, их влияние будет уменьшено. Поскольку при вычислении поля интегрирование производится не по всем $x,y\in(-\infty,+\infty)$, а лишь по конечному промежутку, причем остаток интеграла отбрасывается, то при несоблюдении условия равенства нулю поля на границе области увеличивается погрешность дальнейших вычислений.

Выделение гравитационного поля от источников, локализованных в горизонтальном слое между указанными глубинами. Как правило, из априорных данных известно, что исследуемые аномалии геологических структур залегают на определенной глубине под дневной поверхностью (например, по результатам сейсморазведки). С целью выделения из общего поля составляющей от источников (зон аномальной плотности) в указанном слое, нами предложен следующий метод. С помощью формулы Пуассона для полупространства производим пересчет величины поля на высоты H_1 и H_2, затем поля аналитически продолжаем на глубины $-H_1$ и $-H_2$, решая интегральное уравнение Фредгольма 1-ого рода с регуляризацией (A+αE). Затем поля пересчитываются на уровень земной поверхности, их разность аппроксимирует поле источников между глубинами H_1 и H_2 [1].

О решении обратной задачи (определение плотности). Вычисление трехмерной плотности $\rho(x,y,z)$ неоднородной области D по заданным на множестве внешних точек значениям поля $g(\xi,\eta,\zeta)$ реализуется на основе решения операторного уравнения первого рода:

$$g(M) = S\rho = f\frac{\partial}{\partial\zeta}\int_D \frac{\rho(P)}{R}dxdydz; \qquad (1)$$

S – интегральный оператор в правой части формулы (1); g – известная функция (гравитационное поле). С математической точки зрения такая задача является некорректно поставленной, а ее решение будет сильно зависимым от малых вариаций в исходных данных поля. Но если на множестве корректности решений обратной задачи выделить класс плотностей, которые меняются только по латерали, то задача о нахождении плотности в горизонтальном слое будет вполне устойчивой. В предлагаемом нами методе решения трехмерной линейной обратной задачи плотность ищется в виде произведения зависящей только от глубины функции $\rho_0(z)$ и функции $\Phi(x,y)$:

$$\rho(x,y,z) = \rho_0(z) * \Phi(x,y),$$

$\rho_0(z)$ нужно выбирать по известным априорным данным или, например, по соответствующей зависимости для модели начального приближения. Выбор такого вида зависимости плотности от координат позволяет не только сохранить указанную устойчивость решения задачи, но и учесть неоднородности объектов исследования по глубине. Был реализован итерационный алгоритм локальных поправок с адаптивной регуляризацией для решения линейной обратной задачи гравиметрии [2].

Построение 3D плотностной модели по сейсмическим профилям (изучение строения земной коры и верхней мантии). Заметим, что информация о глубинном строении позволяет разделить наблюденное поле на локальную и региональную составляющие (т.е. решить задачу разделения приповерхностных и глубоко залегающих объектов). Нами разработана поэтапная методика решения задачи сейсмо-гравитационного моделирования:

1. Построение скоростных разрезов по интерпретации сейсмических данных.
2. Определение коэффициентов регрессионной зависимости скорость-плотность для данного региона по результатам 2D гравитационного моделирования.
3. Определение плотностей мантийных блоков из условия изостатической компенсации.
4. Построение 3D модели нулевого приближения интерполированных значений плотности.
5. Вычисление гравитационного поля для модели нулевого приближения. Расчет разности наблюденного и модельного полей.
6. Фильтрация разностного гравитационного поля и его разделение по горизонтальным слоям модельного куба.
7. Послойный подбор значений плотности методом локальных поправок с адаптивной регуляризацией.

8. Построение результирующей 3D модели подобранных значений плотности, составление структурных карт и карт-схем глубинных срезов.

Методика была применена для построения плотностной модели земной коры и верхней мантии территории Тимано-Печерской плиты с координатами 59° – 68° с. ш. и 48° – 64° в. д.. Восстановление трехмерного распределения плотности в неоднородной среде по заданным на дневной поверхности аномалиям гравитационного поля начинается с построения плотностной модели начального приближения. Такая «нулевая» модель строится по сейсмическим профилям и должна отражать лишь характерные (интегральные) закономерности распределения плотности. Плотностные разрезы (допустимы разрезы различного масштаба и глубины) сводятся воедино на цифровой планшет карты аномалий гравитационного поля и выполняется интерполяция двумерных плотностей в межпрофильное пространство. Таким образом, учитывается взаимное расположение разрезов в пространстве, и происходит переход от двумерного массива координат вдоль профильных сечений (с учетом их кривизны) к трехмерному координатному массиву объемной модели.

Для перехода непосредственно к задаче трехмерного гравитационного моделирования необходимо обеспечить продолжение масс за боковые грани плотностного куба и выбрать закон распределения фоновой плотности (плотности относимости) «нормальной» модели. В качестве фоновой плотности «нормальной» модели принимается плотность, зависящая только от глубины. Ее можно получить, усредняя интерполированную плотность по каждому слою начальной модели. Полученная закономерность изменения средней плотности с глубиной распространяется и на законтурное пространство. В этом случае вычисленное гравитационное поле «нормальной» модели (фоновое поле) будет постоянной величиной, а аномальная часть гравитационного поля всегда отнесена к нулевому уровню. Невыбранные остатки гравитационных аномалий (разность между наблюденным и рассчитанным полем «нулевой» модели) служат исходной информацией для решения обратной задачи гравиметрии.

Разделение аномалий наблюденного гравитационного поля по глубине и их связь с глубинными объектами образует стержень интерпретационных схем задач гравитационного моделирования. Фильтрация поля путем повысотных трансформаций обеспечила существенное продвижение вперед в вопросах разделения разноглубинных аномалий [3]. Алгоритмическая реализация разделения полей с применением параллельных вычислений на многопроцессорном комплексе (Института математики и механики УрО РАН) МВС-1000/32 и их связь с глубиной аномалиеобразующих объектов представлена в работе [4]. Расчеты выполнены в рамках модели неоднородного пласта с криволинейными границами. В качестве плотности относимости принята одномерная плотность «нормальной модели».

Построенный «цифровой куб» трехмерной плотностной модели доступен для редактирования с возможностью получения информации по любому сечению вдоль образующей кривой. На его основе возможно построение карт горизонтальных срезов и структурных карт рельефа опорных плотностных границ. Для задач тектонического районирования необходимо представление результата в виде структурных карт-схем изменения плотности в заданном интервале глубин. При этом требуется восстановить структурную границу переменной плотности. В этом случае извлечение данных происходит уже в заданном диапазоне изменения плотности (или скорости). На практическом примере показано, что последовательное вычисление небольших добавок к плотностной модели начального приближения не только обеспечивает устойчивость решения обратной задачи, но и сохраняет содержательность геологической интерпретации гравиметрических данных.

Заключение. На практических примерах продемонстрирована эффективность методов построения плотностных моделей (как при решении задач разведки месторождений, так и изучении глубинного строения регионов), разработанных в Институте геофизики УрО РАН. Построена сейсмо-плотностная модель земной коры и верхней мантии территории Тимано-Печерской плиты. Необходимо учитывать специфику строения земной коры на стадии

регионального и регионально-зонального прогнозирования, при поисках крупных скоплений углеводородов.

Список литературы.

1. Мартышко П.С., Пруткин И.Л. Технология разделении источников гравитационного поля по глубине. Геофизический журнал, 2003, т.25, № 3. С.159-168.
2. Мартышко П.С., Ладовский И.В., Бызов Д.Д. О решении обратной задачи гравиметрии на сетках большой размерности. Доклады академии наук, 2013, т.450, № 6. С.702-707.
3. Мартышко П.С., Кокшаров Д.Е. Об определении плотности в слоистой среде по гравитационным данным. Геофизический журнал, 2005, т.27, № 4. С.678-684.
4. Мартышко П.С., Фёдорова Н.В., Гемайдинов Д.В. Применение параллельных алгоритмов вычислений при изучении структуры аномального магнитного поля Урала. Доклады академии наук, 2012, т.446, № 2 .С.1102-1104.

УДК.550.504

ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДЫ ИСТОЧНИКА РАДОНОВЫХ АНОМАЛИЙ (КАЛИФОРНИЯ)

П.С. Мартышко, В.А. Пьянков, А.Л. Рублев, Д.В. Гемайдинов
Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Мы исследовали на разных высотах морфологию отрицательной региональной аномалии силы тяжести с максимальным значением около 300 мГл (батолит Сьерра-Невада). Эта гравитационная аномалия пространственно совпадает со структурами разломов Сан-Андреас и Калаверас (20-55^0 юш и 90-140^0 зд). В этой статье мы применяем технику фильтрации длинно- и короткопериодных волновых компонентов амплитудного спектра аномалий с помощью численных методов пересчета поля на различные высоты. Для создания многослойной гравитационной модели земной коры мы должны знать морфологию поля различных слоев земной коры. Для этого мы исследовали оптимальные параметры регуляризации трансформации гравитационного поля. Показано, что источником радоновых аномалий является ураносодержащий гранитный батолит Сьерра-Невада.

THE INVESTIGATION OF THE NATURE OF RADON ANOMALIES SOURCE (CALIFORNIA)

P.S. Martyshko, V.A. Pyankov, A.L. Rublev, D.V. Gemaidinov
Institute of Geophysics, Ural Branch of RAS

Abstract. We have investigated the morphology of the negative regional gravity anomaly with maximal value near 300 mGl at different altitudes (Sierra Nevada Batholith). This gravity anomaly spatially coincides with the structures of San-Andreas and Calaveras faults (20-55 degrees S and 90-140 degrees W). In this paper we apply the technique of filtration of the long- and short-wave components of the amplitude spectrum of anomalies, using numerical methods of field simulation at various altitudes. For creation the multilayer gravity model of the Earth crust we need to know the field morphology of different earth layers. For this purpose we have investigated the optimal regularization parameters for gravitational field transformation. It is shown that the source of radon anomalies is uraniferous granite Sierra Nevada Batholith.

Introduction

The construction of regional geological-geophysical models, their refinement, and petrographic specification are based on the method of gravitational modeling. The central problem of the method is the choice of maximally stable geologically informative solutions of the inverse gravity problem from the set of possible equivalents. It is known with certainty that the inverse gravity problem is incorrect, i.e., its solution is nonunique and critically dependent on the initial data. In this paper we attempt to construct three-dimensional geological-geophysical models of practical interest with the help of the joint interpretation of gravity and seismic data in terms of the adopted conceptions. The solution of the inverse problem is based on the method of local correction described by Martyshko and Prutkin [1] in their works. In contrast to other methods (such as the trial-and-error method and the method of the inversion of the forward problem operator), the iteration method of local corrections possesses a greater algorithmic simplicity and ensures a more rapid convergence of the solution. The method of the joint interpretation proposed in the paper makes it possible to narrow the class of possible solutions and makes the algorithm of their construction stable with respect to noise. Our technique uses a new approach for the construction of a few structural boundaries in which components considered as the fields of the boundaries under study are extracted from the observed field. For creation the multilayer gravity model of the Earth crust we need to know the field morphology of different earth layers [2]. We have studied the single gravity anomaly of Sierra Nevada Batholith (Figure 1) to develop a methodology for determining the optimal regularization parameters.

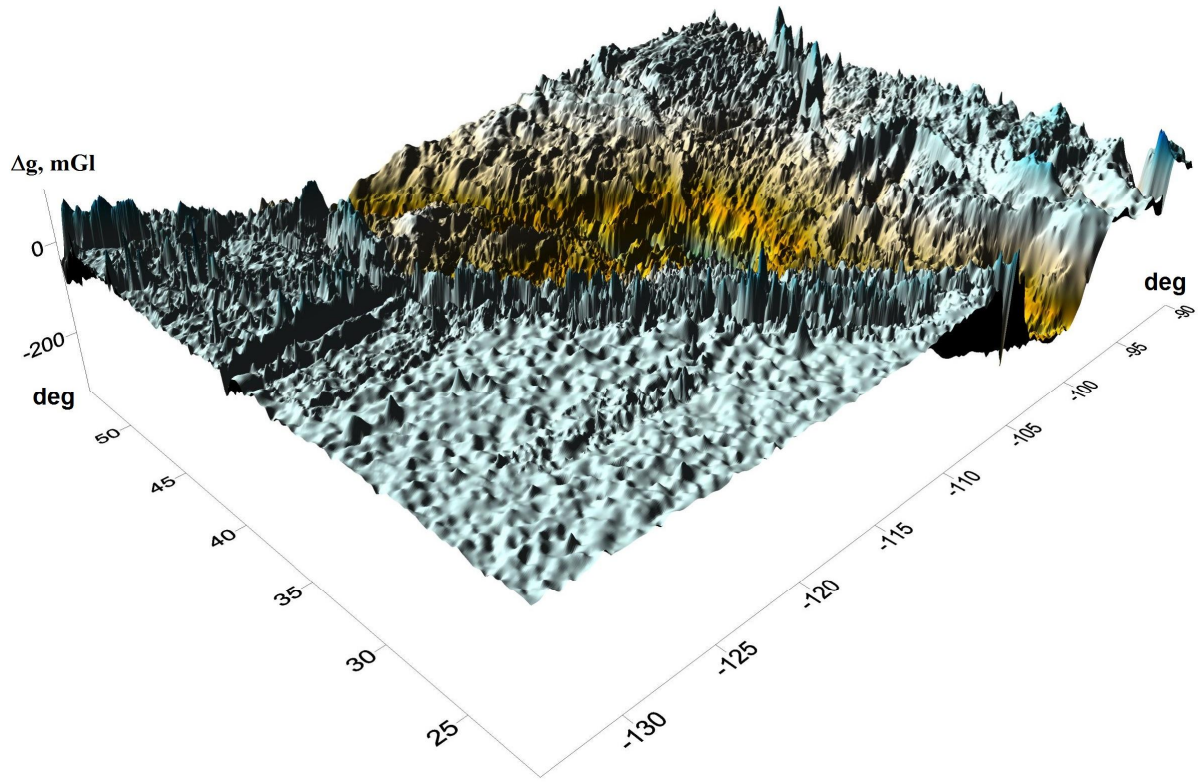


Figure 1 *The gravity field of Sierra Nevada Batholith.*

Method

To divide the long- and short-wave components of the amplitude spectrum of anomalies, geophysicists utilize numerical methods of field simulation at various altitudes. In our paper we investigate gravitational field near transection of San-Andreas and Calaveras faults (S=4029×3646 km). The software implementing parallel algorithms of altitude transformations are developed using the MVAPICH2 library in Fortran programming language. The parallel algorithms for recalculation were implemented in the multiprocessor computing machine for 512 x 512 points of the mesh using 512 cores (processors).

We introduce the rectangular Cartesian coordinates with axis Z pointing downwards and plane XOY coinciding with the surface of the observations. Transformation of the gravity field $U(x,y,z)\big|_{z=0}$ measured on the Earth's surface area $D=\{(x,y)\in R^2 : a\le x\le b, c\le y\le d\}$ upwards to the level $z=-H$ is made by the Poisson formula:

$$U(x,y,-H)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty}\frac{-H}{\left[(x-x')^2+(y-y')^2+H^2\right]^{3/2}}U(x',y',0)dx'dy'. \qquad (1)$$

For recalculating the gravity field downwards to depth $z = H$ and finding the values $\overline{U}(x,y,-H)$, we solve Fredholm equation of the first kind:

$$Ku\equiv\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty}\frac{2H}{\left[(x-x')^2+(y-y')^2+4H^2\right]^{3/2}}\overline{U}(x',y',H)dx'dy'=U(x,y,-H). \qquad (2)$$

After discretization of the integrated equation (2), we obtain a system oflinear algebraic equations. Equation (2) belongs to the class of ill-posed problems; therefore, its solution implies regularization by a shift (Lavrent'ev 1962).

$$(K+\alpha I)u=\overline{U}, \qquad (3)$$

where α is the regularization parameter.

To solve Eq. (3), we used the iteratively regularized method of simple iteration:

$$u^{k+1}=u^k-\frac{1}{\lambda_{\max}}\left[(K+\alpha I)u^k-\overline{U}\right], \qquad (4)$$

where λ_{max} is the maximal eigenvalue of matrix $K + \alpha I$ (symmetric case).
The condition of iteration stop is the satisfied inequality

$$\frac{\left\| Ku^k - \bar{U} \right\|}{\left\| \bar{U} \right\|} < \varepsilon \qquad (5)$$

with a sufficiently small ε.

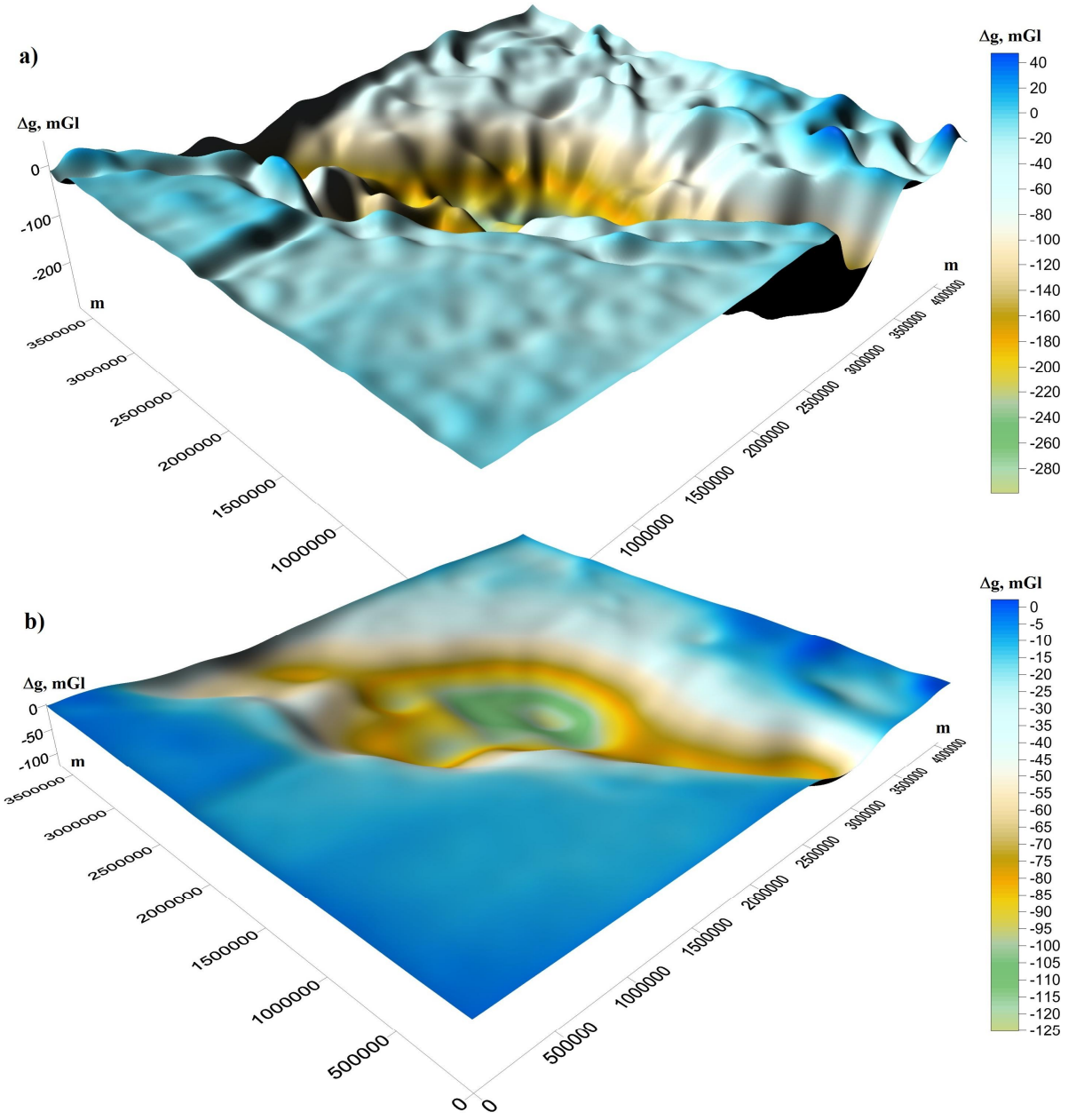


Figure 2 *Transformations of the gravity field to a depth of 70 km for different regularization parameters: a) α=0.86, b) α=0.01.*

Selecting the regularization parameter

In our paper we investigate the optimal regularization parameters for gravitational field transformation. The downward continuation procedure is an ill-posed problem so the regularization is applied. For selecting the regularization parameter α, we used the results of the transformation of the gravity anomalous field (Sierra Nevada Batholith). The problem of this paper to divide the long- and short-wave components of the amplitude spectrum of anomalies, geophysicists utilize numerical methods of field simulation at various altitudes. For this purpose, we used to calculate a

set of gravity field values recalculated to a height of -*H* and the corresponding field recalculated down on *2H* and related to the level of the earth's surface. The calculations were made for the altitudes *H* = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 100, 150 and 200 km. Recalculation to the Earth's surface is given for the regularization parameters α from 0.01 to 0.86. The difference between the transformations of the gravity field to a depth of 70 km for different regularizes (α equal 0.86 and 0.01) is shown in Figure 2.

Next, for set of regularization parameters α value of the difference of fields recalculated to a height -*H* and related to the level of the earth's surface was determined. We have found such a value regularizer α, where the differences of squares of deviations of the corresponding field values have reached its minimum. In addition, the correlation coefficients of the difference of fields with the field, converted to a height -*H* were determined. The optimum values of the regularization parameter α are shown in the graph, and approximated by a polynomial of degree 4 (Figure 3).

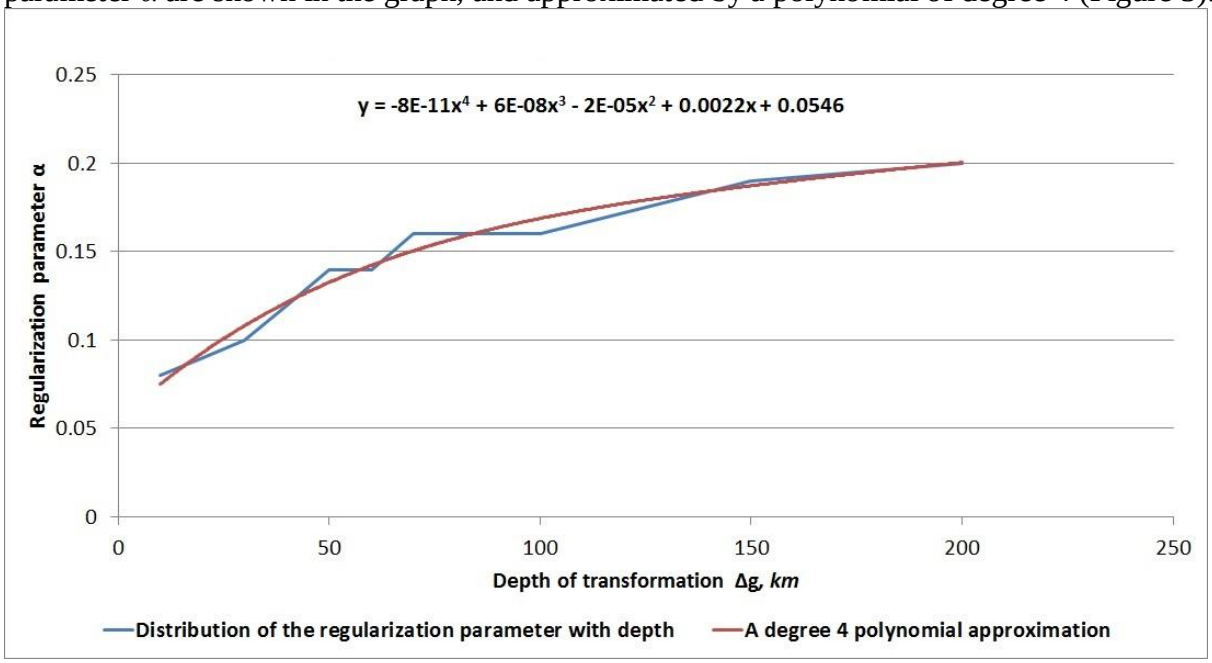


Figure 3 *Distribution of the regularization parameter with depth.*

Conclusions

Our investigations have shown:

1. Analysis of the morphology of the regional single negative gravity anomaly Sierra Nevada at different altitudes characterizes general law of the regularization parameter distribution. That is narrow range of its values: 0.07 – 0.2.
2. The small variations of the regularization parameter reduce to big variations of transformed gravity field.
3. The authors suggest to use the results of this research for solving the gravity inverse problem for multilayered earth crust on the Arctic Urals.

Acknowledgements

We thank Romanyuk T.V. for providing the actual gravity data.

References

1. Martyshko, P.S. and Prutkin, I.L. [2003] Technology for separating the gravity sources by the depth. *Geofizicheskiy Zhurnal* **25**(3), 159–168.
2. Martyshko, P.S., Ladovskii, I.V. and Tsidaev, A.G. [2010] Construction of regional geophysical models based on the joint interpretation of gravity and seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* **46**(11), 931–942. DOI: 10.1134/S1069351310110030

УДК 550.361

СВОБОДНАЯ ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В ВЫСОКОПРОНИЦАЕМЫХ СЛОЯХ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ С РАЗЛИЧНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ

Миндубаев М.Г., *mansur_mg@mail.ru*
Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация

Abstract. A numerical study of free thermal convection in a porous medium to high permeability layers placed in an impenetrable array is presented. The boundary conditions for the temperature set on the borders of impervious area. Estimates of the heat flux at the upper boundary of the containing array at different orientations permeable layers which realize the free thermal convection is obtained.

Проводится численное исследование свободной тепловой конвекции в слоях пористой и проницаемой среды, насыщенной однокомпонентной вязкой жидкостью, помещённых в малопроницаемый массив при различных углах наклона к горизонтальной поверхности. Рассматривается модель, в которой внутри основного объёма находится область, проницаемость которой значительно выше, чем в окружающем массиве [1].

Система безразмерных уравнений свободной тепловой конвекции в пористой среде для несжимаемой жидкости в проницаемой области, имеет вид [2,3]:

$$\mathbf{u} = -\nabla p + \mathrm{Rd}\,\theta \mathbf{e}_z,$$
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \mathbf{u}\cdot\nabla\theta = \nabla^2\theta, \qquad (1)$$
$$\nabla\cdot\mathbf{u} = 0,$$

где $\mathrm{Rd} = \alpha g H \Delta T_H K / \nu\kappa_{ef}$ – число Рэлея-Дарси; $\mathbf{u} = \eta\,\mathbf{v}$ – скорость Дарси фильтрации флюида в пористой среде; η – пористость среды; $\mathbf{v}$ – средняя скорость частиц флюида в порах; p – давление; α – коэффициент теплового расширения флюида); g − ускорение свободного падения; $\theta=(T-T_0)/\Delta T_H$ – безразмерная температура, T_0 – температура на верхней холодной границе слоя, ΔT_H – вертикальная разница температур в слое мощностью H, α – коэффициент теплового расширения флюида. Температура θ изменятся от $\theta_0=0$ на верхней границе до $\theta_1=c=\Delta T/\Delta T_H$ на нижней, где ΔT – разность температур между изотермическими горизонтальными границами вмещающей области. Значение параметра c подбирается в зависимости от угла наклона проницаемого слоя.

В качестве единиц принято: для единицы длины – толщина проницаемого слоя H с проницаемостью K_1, для скорости фильтрации – κ_{ef} / H, времени – bH^2/κ_{ef}, давления – $\rho_0\nu\kappa_{ef}/K$, где κ_{ef} – эффективный коэффициент температуропроводности среды, $b=(\rho c_p)_c/(\rho c_p)_f$ – отношение теплоёмкостей среды и флюида, ν – кинематическая вязкость флюида. Будем считать, что во вмещающей непроницаемой области течение отсутствует. Соответствующее уравнение для распространения тепла в этой области:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2\theta \qquad (2)$$

Примем, что нижняя и верхняя границы вмещающей области являются изотермическими. На боковых границах принимаются условия отсутствия потока тепла: $\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0.$ Для проекций скорости $\mathbf{u}$ на оси x и z принято соответственно: $u = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$, где ψ – функция тока. При таком выборе выражения для функции тока, соотношение $\nabla\cdot\mathbf{u} = 0$ выполняется автоматически. На границах проницаемой области для функции тока принято: $\psi=0$.

Применяя к первому уравнению (1) операцию «rot» и учитывая граничные условия, система уравнений свободной тепловой конвекции во внутренней области в переменных (ψ, θ) выглядит следующим образом:

$$\nabla^2\psi = -\mathrm{Rd}\frac{\partial\theta}{\partial x},$$
$$\frac{\partial\theta}{\partial t} + \frac{\partial\psi}{\partial x}\frac{\partial\theta}{\partial x} - \frac{\partial\psi}{\partial z}\frac{\partial\theta}{\partial z} = \nabla^2\theta, \qquad (3)$$

Задача решалась методом конечных разностей на неравномерной прямоугольной сетке. Для решения первого уравнения в (3) использовался итерационный метод последовательной верхней релаксации, а для второго уравнения в (3) и (2) использовался метод сквозного счёта и применялась неявная разностная схема переменных направлений [4,5].

На рис.1 и рис.2 представлены результаты численного моделирования для проницаемого слоя в виде антиклиналей (а) и синклиналей (б) при различных значениях числа Рэлея-Дарси *Rd*. При небольших значениях рис.1 реализуется многоячеистая структура конвекции при этом для антиклиналей (а) в центре отчётливо выделяется отрицательная аномалия плотности теплового потока q_c/q_d <1. Напротив, для синклиналей (б) отрицательные аномалии характерны на краях структур.

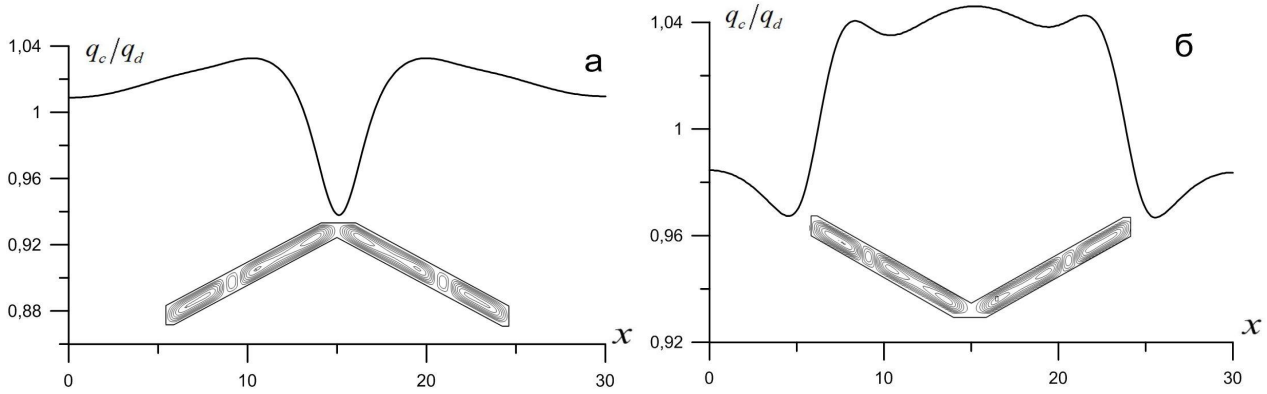


Рис.1. Изолинии функции тока ψ в проницаемых областях при *Rd*=40 и угле наклона α=25,6˚. (а) – антиклиналь, (б) – синклиналь. Отношение плотностей теплового потока q_c/q_d на верхней границе непроницаемой области, где q_c – плотность теплового потока, обусловленного наличием конвекции и q_d – в отсутствии конвекции.

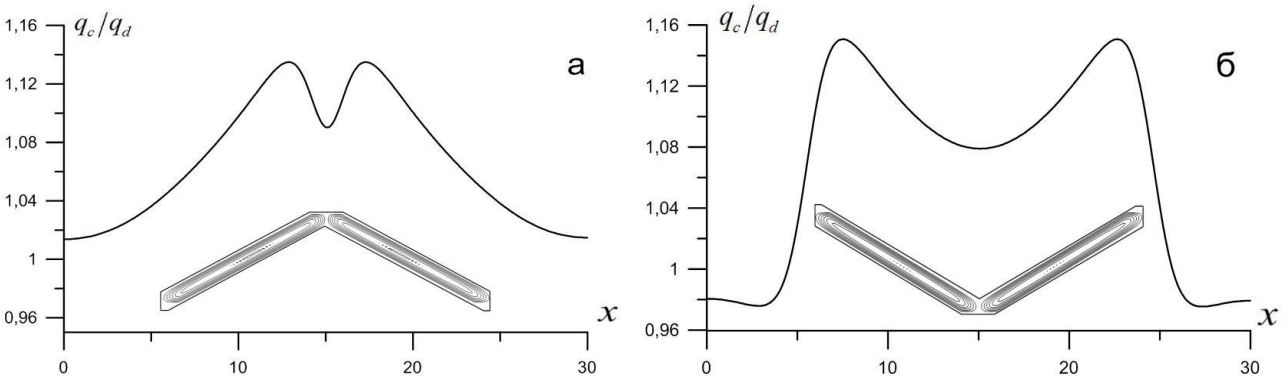


Рис.2. То же что на рис.1. *Rd*=60.

Для более интенсивной конвекции представленной на рис.2 характерна одноячеистая структура для каждого из рукавов. Амплитуды аномалий теплового потока выше, при этом в центре прослеживаются минимумы, а для синклиналей (б) на периферии при умеренной

конвекции сохраняются отрицательные аномалии. Качественно картина распределения теплового потока, представленная на рис.2а схожа с распределением теплового потока в районах срединно-океанических хребтов.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы УрО РАН 15-18-5-32.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Миндубаев М.Г. Результаты численного моделирования 2D конвекции в наклонных пористых слоях.//Уральский геофизический вестник. –2014. –№1(23). –С.67-71.
2. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости.– М.: Наука, 1972. – 392 с.
3. Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. – New York: Springer. 2006. – 640 p.
4. Берковский Б.Н., Ноготов Е.Ф. Разностные схемы исследования задач теплообмена. – Минск. Наука и техника, 1976. – 142 с.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем.– М.: Наука. 1989. – 616 с.

УДК 550.8.05(470.324)

МЕТОД ЛОКАЛЬНЫХ ПОПРАВОК ПРИ ПЛОТНОСТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ

THE METHOD OF LOCAL CORRECTIONS FOR DENSITY MODELING OF THE LITHOSPHERE

О.М. Муравина, В.Н. Глазнев*, muravina@geol.vsu.ru, glaznev@geol.vsu.ru*
Воронежский госуниверситет, Воронеж, Россия

Abstract. *For density modeling of a lithosphere within big territories it is offered to use the modified method of local amendments. Distinctive feature of the offered approach is the way the organization of redistribution nonviscous of density in model layers. Density discrepancy is divided by method of an adaptive filtration on smoothed and local to a component. Local density discrepancy is redistributed in the set small quantity of the top layers, practically in a vertical column, and the regional part nonviscous is redistributed in other layers of model on the basis of the quasinormal decision in a cone with the set half-width of a raster according to the accepted weight function.*

Рассмотрим подход к решению обратной задачи гравиметрии, который был успешно применен для построения комплексной модели литосферы Воронежского кристаллического массива (ВКМ) и сопредельных территорий.

Инверсия гравитационного поля выполняется модифицированным методом локальных поправок. Как известно, метод локальных поправок позволяет эффективно работать с входными данными, представленными большими массивами чисел, что позволяет эффективно использовать его при плотностном моднлировании литосферы для больших терррриторий[2,7.8,9]. Устойчивость решения достигается за счет организации итерационного процесса таким образом, чтобы в каждой расчетной точке последовательно выполнять коррекцию стартовой модели.

Стартовая модель играет важную роль в обеспечении геологической содержательности решения. Эта модель строится на основе априорной информации, аккумулирует и обобщает сейсмические, петрофизические и геологические данные, относящиеся к территории исследований. При решении обратной задачи регионального характера стартовая модель описывается значительным числом параметров и характеризуется высокой степенью сложности. Фактически в процессе инверсии поля осуществляется уточнение стартовой модели в заданных пределах изменения параметров с целью получения распределения масс эквивалентных наблюденному полю (1)

$$\left\| F(\Delta\sigma(\theta,\phi,r) - \Delta g(\lambda,\varphi,h \right\| \le \delta \ , \qquad (1)$$

Таким образом, исходная стартовая модель преобразуется в состоятельную модель среды, обладающую свойствами адекватности и эквивалентности [11].

Стартовая модель задает распределение абсолютных значений плотности в нижнем полупространстве. Поэтому, важным вопросом является переход от абсолютных значений плотности σ(λ,φ,h) к избыточным Δσ(λ,φ,h) и, соответственно, от наблюденных значений гравитационного поля к аномальным значениям (2, 3). В качестве нормального поля γ0 и нормальной плотностной модели корректно использовать вычисленное на уровне геоида планетарное поле Земли и соответствующую этому полю плотностную континентальную модель ПМЗ-К [4].

$$\Delta\sigma(\theta,\phi,r) = \sigma(\theta,\phi,r) - \sigma_0(\theta,\phi,r) \ , \qquad (2)$$

$$\Delta g(\lambda,\varphi,h) = g_{набл}(\lambda,\varphi,h) - \gamma_0(\lambda,\varphi,h) \ . \qquad (3)$$

В процессе итерационного подбора в каждой расчетной точке решается прямая задача с использованием рекурсивного алгоритма и определяется невязка наблюденного и

расчетного полей [5.6]. После проверки условий, регулирующих точность решения обратной задачи и предельное число итераций по значению невязки поля оценивается плотность простого эквивалентного слоя решением обратной задачи согласно принципам, рассмотренным в работах [1,2]. Таким образом, в каждой точке вычислений осуществляется переход от невязки поля к невязке плотности.

Отличительной особенностью предложенного подхода от традиционного метода локальных поправок является способ организация перераспределения невязки плотности в слои модели. Невязка плотности методом адаптивной фильтрации разделяется на сглаженную и локальную компоненту. Локальная невязка перераспределяется в заданное малое количество верхних слоев, практически в вертикальный столб, а региональная часть невязки перераспределяется в остальные слои модели на основе квазинормального решения в конус с заданной полушириной растра в соответствии с принятой весовой функцией.

Рассмотрим программу итерационного решения региональной обратной задачи в сферической постановке, использованную при построении модели литосферы Воронежского кристаллического массива и сопредельных территорий. На первом шаге осуществляется ввод массивов входных данных, организованных как массивы следующих видов: 3D слоистая модель плотности типа «λ_φ_R_σ», 3D слоистая модель ограничений на плотность типа «λ_φ_R_ σmin_ σmax», 3D слоистая модель пространственной весовой функции типа «λ_φ_R_H», сформированные на нерегулярной сетке по R, и 2D модель гравитационного поля типа «λ_φ_R_R_Vz». В процедуре решения глобально определены ранее вычисленные параметры, такие как нормальная (постоянная) плотность в модели среды [8], необходимые геометрические параметры стартовой модели и другие.

Решение прямой задачи выполняется на основе рекурсивного алгоритма [9, 10]. Входная слоистая модель трансформируется в модель типа «λ_φ_R_ΔR_ΔL_σ», которая представляет собой совокупность сферических пластин, размер которых зависит от степени близости центра элементарного тела к точке расчета поля. Аппроксимация среды основана на использовании внутреннего рекурсивного вызова, который позволяет, когда это необходимо, осуществить дополнительное разбиение исходного элементарного тела вдоль вертикальной оси на сферические пластины меньшей мощности. Использование внутренней рекурсии позволяет добиться необходимого качества дискретного представления среды.

На следующем шаге вычисляется результативная невязка поля и, после проверки условий, регулирующих точность решения обратной задачи и предельное число итераций, осуществляется вызов подпрограммы расчета плотности простого эквивалентного слоя [1, 11]. Таким образом, осуществляется переход от невязки поля к невязке плотности. Невязка плотности методом адаптивной фильтрации разделяется на закономерную (сглаженную) и резкопеременную (локальную) компоненты Для выполнения этой процедуры задается полуширина (радиус) интервала сглаживания в единицах шага сетки по горизонтали и величина порога в долях локальной средней дисперсии плотности. Перераспределение эквивалентных масс простого слоя в нижние слои осуществляется в соответствии с принципом получения нормального решения, что обеспечивает сходимость итерационного процесса при условии достаточной адекватности стартовой модели.

Распределение как локальных, так и региональных поправок зависит от значений весовой функции, которая рассчитывается для каждой точки среды. Весовая функция является энтропией и характеризует меру неопределенности при переходе от скорости к плотности в выделенных сейсмогеологических слоях среды [2].

Как уже отмечалось выше важной особенностью модифицированного метода локальных поправок является принцип пространственного перераспределения невязок. Локальные поправки плотности модели перераспределяются в заданное количество верхних слоев (гравиактивный и, частично, диоритовый) в вертикальный столб в соответствие с весовой функцией [3]. (Рис.1).

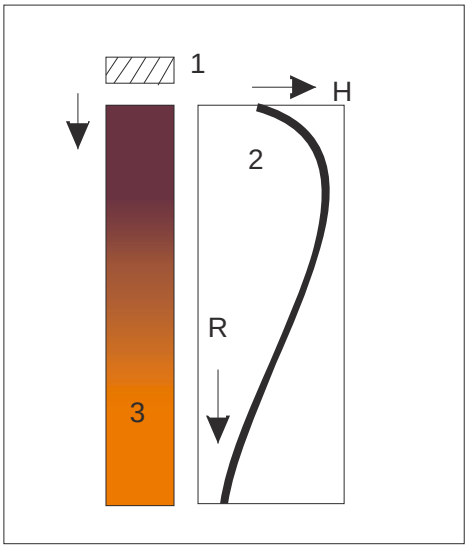


Рис.1 Перераспределение локальной невязки плотности эквивалентного слоя в верхние слои в вертикальный столб в соответствие с весовой функцией: 1 – эквивалентный слой; 2 – график весовой функции H; 3 – область перераспределения невязки плотности.

Региональная часть невязки перераспределяется на основе квазинормального решения во всем модельном слое в конус с заданной полушириной растра (рис.2). Полуширина растра β для конуса локального пространственного перераспределения сглаженной поправки в плане задается в диапазоне от 1° до 60°, что фактически определяет характер локализации плотностных неоднородностей в результативной модели.

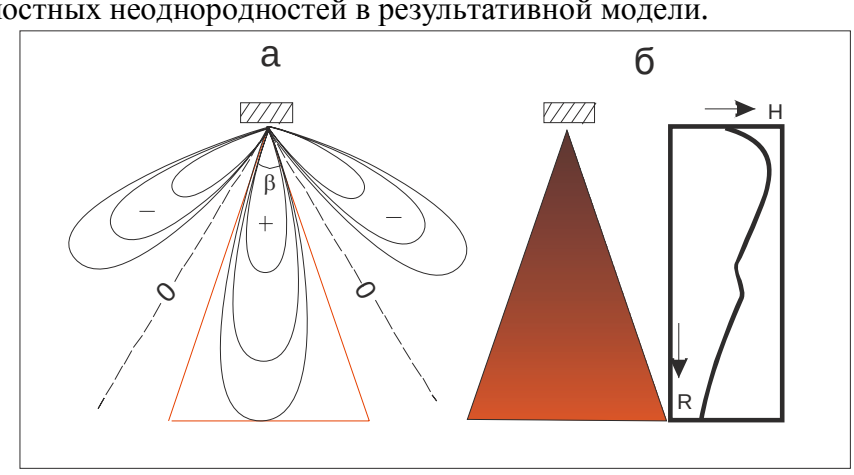


Рис.2 Перераспределение сглаженной невязки плотности эквивалентного слоя в нижние слои на основе квазинормального решения (а) в конус с заданной полушириной растра в соответствие с весовой функцией (б).

На заключительном шаге выполняется коррекция модели, и итерационный процесс повторяется до выполнения условия по невязке в форме (1).

Литература

1. Алексидзе, М.А. Приближенные методы решения прямых и обратных задач гравиметрии / М.А. Алексидзе. М.: Наука, 1987. – 336с.
2. Глазнев, В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии / В.Н. Глазнев. Апатиты: «КаэМ», 2003. – 252с.
3. Глазнев, В.Н. Сейсмо-плотностная модель земной коры Воронежского кристаллического массива / В.Н. Глазнев, О.М.Муравина, А.И.Дубянский / Материалы 42-ой сессии международного семинара им. Д.Г.Успенского «Вопросы теории и практики

геологической интерпретации геофизических полей». – Пермь: ИГФ УрО РАН, 2015. – С. 43–46.

4. Картвелишвили, К.М. / Планетарная плотностная модель и нормальное гравитационное поле Земли/ К.М. Картвелишвили. – Москва: «Наука»,1982.- 87с.

5. О решении прямой задачи гравиметрии на сфере для градиентно-слоистых моделей среды / В.Н. Глазнев [и др.]; под ред. Н.В. Шарова / Проблемы комплексной интерпретации геолого-геофизических данных. – Л.:Наука, 1991. С. 183-188.

6. Глазнев, В.Н. Решение прямой двухмерной задачи магнитометрии с использованием адаптивной аппроксимации тела / В.Н. Глазнев, Лошаков Г.Г. /Материалы 39-ой сессии международного семинара им. Д.Г.Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». – Воронеж: ВГУ, 2012. . – С. 80-83.

7. Глазнев, В.Н., Павловский В.И., Раевский А.Б. Методические указания по интерпретации осредненных гравитационных аномалий / В.Н.Глазнев, В.И. Павловский А.Б. Раевский. – Апатиты: КФАН СССР, 1977. – 20с.

8. Мартышко П.С. О решении обратной задачи гравиметрии на сетках большой размерности / П.С. Мартышко, И.В. Ладовский, Д.Д. Бызов / Докл. АН . – 2013, Т.450.6. – С.702-707

9. Мартышко П.С. Построение региональных геофизических моделей на основе комплексной интерпретации гравитационных и сейсмических данных / П.С. Мартышко, И.В. Ладовский, А.Г. Цидаев / Физика Земли, 2010, № 11, с.23-35.

10. Муравина О.М. Методика создания петрофизической модели осадочного чехла Воронежского кристаллического массива и его обрамления / Материалы седьмых научных чтений Ю.П.Булашевича «Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли». – Екатеринбург, 2013. С. 206-208.

11. Страхов В.Н. О подходе к решению обратных задач гравиметрии, основанном на теории эквивалентных перераспределений масс // Докл. АН СССР . – 1997. Т. 236.3. . – С.571-574.

УДК 621.384.326

КУДА УХОДИТ ВОДА ОЗЕРА ЧАД?

Р.Д. Мухамедяров *– генеральный директор ЗАО «Институт аэрокосмического приборостроения», д.т.н., профессор КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, академик РАЕН, г. Казань, m.robert17@mail.ru*

Использование технологии МВТГМ позволило обнаружить новое подземное водохранилище являющееся предпольем озера Чад, питающееся, в основном, стоком рек Шари и Логона и объемом, равным годовому стоку этих рек. А также показать, что это подземное озеро имеет подземный сток в реку Бенуа.

WHERE DOES THE WATER IN THE LAKE CHAD GO?

R.D. Mukhamedyarov *- General Director CJSC "Institute of Aerospace Instrumentation", Doctor of Engineering sciences, Professor of Kazan National Research Technical University named after Tupolev, Academician of the RANS, Kazan city, m.robert 17@mail.ru*

The use of the technology MVTGM allowed us to discover a new underground reservoir which is a foreground of lake Chad, it is fed primarily by a runoff of Rivers Chari and Logone and the volume equal to the annual flow of these rivers. And to show that this underground lake has a base flow in the River Benue.

В геологоразведке главное как можно быстрее, точнее и дешевле выявить контуры и глубину залегания искомых полезных ископаемых. Это можно сделать, если до постановки дорогостоящих полевых работ и сейсморазведки 2D/3D ставить «космические» методы геологоразведки 2D/3D и 3D/4D, которые намного дешевле, быстрее и не менее информативные. Предлагаемая технология «МВТГМ» позволяет за короткие сроки (5-7 месяцев) отснятые со спутника огромные интересующие территории площадью, к примеру, 2-3, 5-10 тыс. и более кв. км, послойно, как в компьютерной томографии, прозондировать с заданным шагом (к примеру, 1, 2, 5, 10, 30, 60, 90, 120 метров) и выявить на больших глубинах (от 0 до 12 км и ниже) перспективные геологические структуры на нефть, газ, подземные воды, битум, уран, золото, калийные соли и др. интересующие полезные ископаемые. [1-4]

К настоящему времени оптико-электронная регистрация и преобразование невидимых тепловых изображений в видимые изображения (тепловидение) доведены до высочайшей степени совершенства. Но для наблюдения объектов внутри непрозрачной геологической среды стали необходимы специальные подходы, которые реализованы в принципиально новом методе теплового сканирования Земли – методе видеотепловизионной генерализации.

Метод видеотепловизионной генерализации Мухамедярова (МВТГМ) основан на прикладных следствиях двух лемм-гипотез, выдвинутых и активно используемых автором с 80-ых годов прошлого столетия

- тепловое излучение помнит о своем происхождении;
- глубинная структура Земли полупрозрачна в оптическом диапазоне длин волн.

Метод позволяет вести поиск аномалий температурного поля Земли с глубиной, то есть определять области аномалий масс-энергетического обмена в различных геолого-геофизических слоях Земли [1-5].

Покажем возможности метода МВТГМ при исследовании одной из главных экологических проблем современной Африки - пересыхание озера Чад.

Пресноводное озеро Сахары - **озеро Чад**, расположилось на границе четырех государств: Нигера, Чада, Камеруна и Нигерии. Озеро расположено далеко от морского побережья Африки, в одном из самых засушливых мест на земле. Но благодаря своему существованию дает жизнь множеству животных, растений и большому количеству людей живущих по его берегам. Озеро смягчает климат на большой площади, давая возможность

местным народам заниматься рыболовством, скотоводством и поддерживать свое существование.

Однако ситуацию, которая сложилась с озером Чад, можно назвать экологической катастрофой. За последние десятилетия уровень воды и площадь озера уменьшились в разы, а численность населения проживающего вокруг него утроилась, уровень лова рыбы вырос так же многократно, что уже почти привело к ее полному исчезновению в озере. Катастрофа на озере Чад это не только экологическая, но и гуманитарная катастрофа, учитывая, сколько людей живут в его непосредственной близости и пользуются его благами (рис.1).

Рис. 1. Процессы высыхания озера Чад с 1963 по 2007 года по данным космических съемок видимого диапазона, нулевой слой по технологии МВТГМ.

Исходя из важности озера и тех проблем, которые стоят перед людьми и экосистемой региона, постоянно на международном уровне проходят встречи, обсуждения конкретных планов по спасению озера. Так, есть предложение перенаправить в озеро потоки воды из других африканских рек.

В частности, предлагают использовать часть воды из бассейна реки Конго в провинции Киву, и перенаправить ее через канал длинной в 2400 км. Проект называется **"Трансаква"** и если он будет реализован, то это станет крупнейшим проектом по переброску рек в Африке. По мнению сторонников этого проекта, его реализация сможет обеспечить едой от 50 до 100 миллионов людей в регионе озера. Помимо этого осуществление переброски вод через канал позволит так же улучшить транспортную сеть в центре Африканского континента, где транспортная сеть довольно слабо развита. Кроме того на канале планируется сооружение гидростанций, что так же позволит вырабатывать около 35 млрд кВтч / год.

Другой проект, который в настоящее время является предметом технико-экономического обоснования, основан на идее питать из реки Убанги на границе Демократической Республики Конго и Центрально Африканской республики реку Шари, главный приток озера Чад. Этот проект потребует рытья канала длиной около 1300 км.

Тем не менее, некоторые эксперты пытаются предостеречь от таких решений, которые могут поставить под вопрос очень тонкий баланс гидрологической системы, которая естественно питает озеро на протяжении тысячелетий. Эти исследователи приводят данные, которые доказывают, что уровень озера сильно варьируется в разные исторические эпохи (рис. 2). Так в XV веке даже констатировали исчезновение озера на 20 лет. А в начале XX уровень его был сопоставим с современным.

Федеральное Министерство водных ресурсов Нигерии дает следующую оценку поступающих вод в озеро Чад (оценка 2012 года) питающих рек:

- ***Chari Logone*** - 40,4 кубических километра;
- ***El Beid*** - 6,6 кубических километра;
- ***Komadugu – Yobe*** - 0,5 кубического километра;
- ***Yedseram*** – 0,1 кубического километра.

На научно-техническом совете Министерства водных ресурсов Нигерии, проходившем в 20-ых числах апреля 2012 года статс-секретарем и заместителем министра г-ном Умаром Фархи Хаиджи, Институту аэрокосмического приборостроения (г. Казань) была поставлена задача: найти, куда уходит вода озера Чад и представить конкретные инженерные решения по обеспечению водой северо-восточных штатов Нигерии.

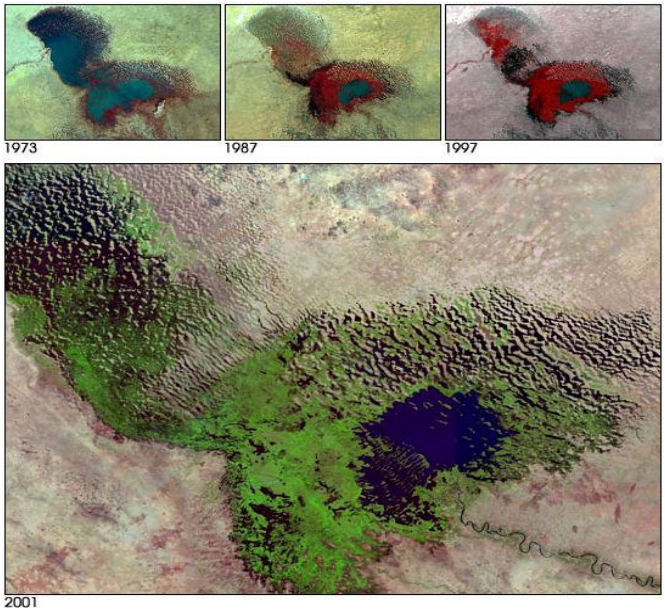


Рис.2 Снимки озера Чад с КА LandSat – 7 с 1973 по 2001 год в видимом диапазоне (панхромат) нулевой слой по технологии МВТГМ

ИАКП на основе технологии МВТГМ была проведена научно-исследовательская работа на основе космических съемок и априорных данных, полученных из этого Министерства.

Результаты наших исследований были доложены на заседании того же научно-технического совета Министерства водных ресурсов Нигерии в октябре 2012 года, т.е. через полгода (6 месяцев).

В данном сообщении приведены очень фрагментарно результаты наших исследований по проблематике озера Чад и снабжения водой северо-восточных штатов Нигерии, примыкающих к этому озеру.

Первый результат касается района расположения реки Комадугу-Йобе, являющейся пограничной рекой между государствами Нигер и Нигерия (рис. 3), которая на поверхности (по технологии МВТГМ являющейся первым слоем) показывает свою маловодность и по данным Министерства имеет годовой сток не более 0,5 куб. км. Однако наши исследования по технологии МВТГМ показали, что эта река имеет русло подземной Палео-реки. начинающейся со штата Кано и доходящей до озера Чад. Объем воды в этой Палео-реке превышает на порядок официальные данные Министерства.

Это же характеризует распределение населения в бассейне реки Комадугу-Йобе (рис.3): на стороне государства Нигер (в северной части реки Комадугу-Йобе) плотность населения выше более чем в сорок раз, чем в штате Борно государства Нигерия (южная часть той же реки). Население, проживающее в районе северной части реки Комадугу-Йобе в пустыне Сахара, пользуются подземными водами Палео-реки Комадугу-Йобе (рис. 5).

На топографических картах Нигерии река Эль-Бейд берет начало в горной местности на севере плоскогорья Адамава, на топографических картах Генерального штаба СССР, выпущенных в шестидесятые годы XX века река Эль-Бейд берет начало в болотистой местности заповедника Wasa Nation Park расположенного в северной части государства Камерун и по длине в два раза короче, чем на картах Нигерии (рис.4).

Наши исследования по технологии МВТГМ по алгоритму блоково-разломной структуры показали, что река Эль-Бейд с годовым стоком в 6,6 кубических км берет свое начало в обнаруженном нами гигантском подземном водохранилище, минимальная оценка которого составляет более 40 кубических километров подземных вод, находящиеся на стыке границ между государствами Камерун и Чад южнее озера Чад и являющемся предпольем

озера Чад (рис.5 и рис.6), подпитываемого двумя реками Шари и Логоне, что составляет годовой сток этих рек.

Рис.3 Распределение населения в бассейне реки Комадугу-Йобе

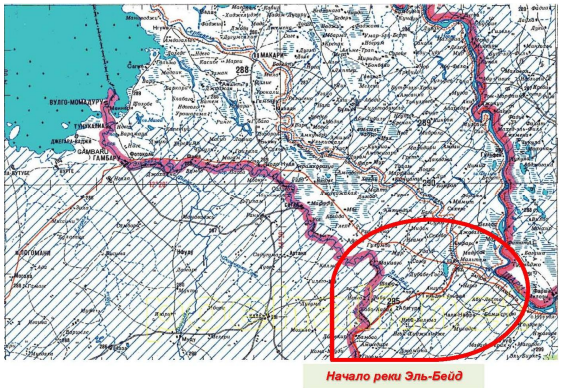


Рис 4. Река Эль-Бейд на топографических картах Нигерии

Рис.5 Технология МВТГМ по алгоритму блоково-разломной структуры на глубине h ≥ 500 м

Наши исследования по технологии МВТГМ впервые показали, что это подземное водохранилище в своей южной части имеет подземный сток в реку Бенуа в виде разломной зоны, что значительно уменьшает сток реки Эль-Бейда в бассейн озера Чад. (рис. 6 и рис.7)

Так же наши исследования показали, что река Yedseram текущая в штате Борно имеет годовой подземный сток на порядок больше, чем заявленных Министерством водных ресурсов Нигерии.

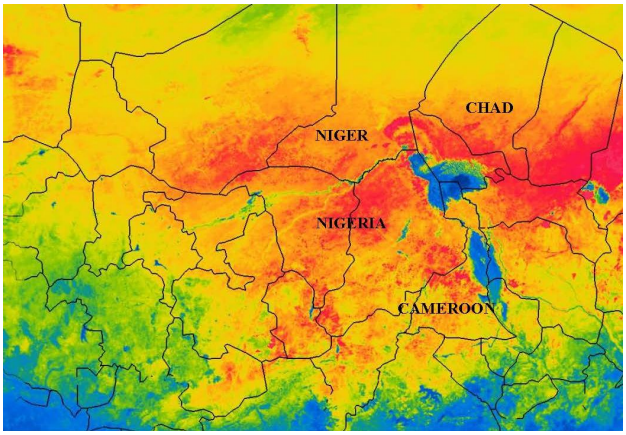


Рис.6. Обнаруженное подземное водохранилище на глубине до одного км. Космический снимок теплового диапазона обработан по технологии МВТГМ.

В сравнении с распространенной сейсморазведкой 2D/3D в геологоразведке технология МВТГМ дает выигрыш во времени от 3 до 10 раз, в стоимости от 4 до 20 раз и

позволяет обрабатывать огромные площади, что показали наши исследования по проблеме озера Чад за очень короткие сроки – 6 месяцев.

Кроме того, главное преимущество технологии МВТГМ – она позволяет строить геологические пространства 4D [5].

Необходимо по аналогии решить проблему Аральского моря, территориально находящегося в государствах Казахстан и Узбекистан в центральной Азии.

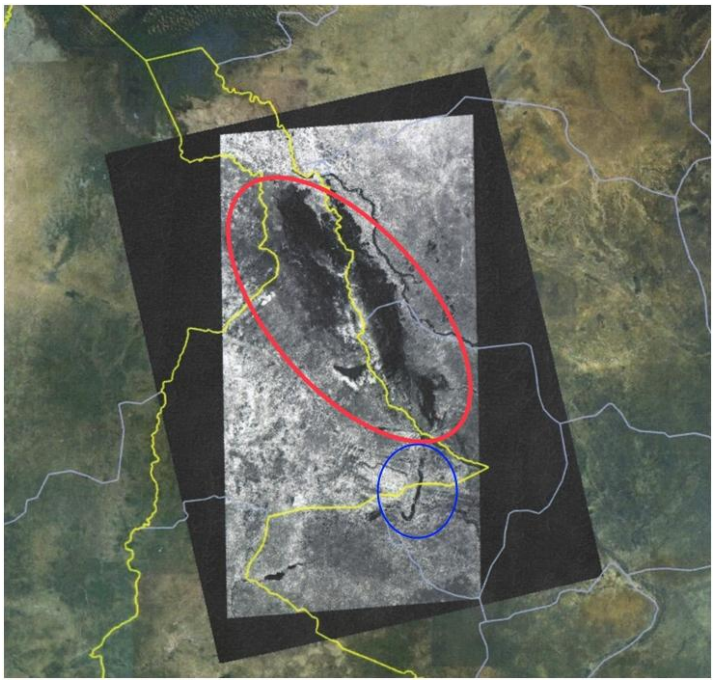


Рис.7 Наложение обработанного изображения на спутниковый снимок в видимом диапазоне с указанием международных границ
Желтым цветом обозначены границы государства Камерун
Красным - обнаруженное подземное водохранилище
Синим контуром обозначена связь обнаруженного водохранилища с бассейном реки Бенуе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухамедяров Р.Д. Метод видеотепловизионной генерализации и его аэрокосмическое аппаратурное оснащение. Интервал, № 9(44), Самара, 2002, с. 59-62.
2. Мухамедяров Р.Д. Метод видеотепловизионной генерализации аэрокосмических съемок для решения фундаментальной геофизической задачи построения геоструктуры Земли в глубины от десятков метров до 120 км. Перспективные направления и механизмы региональной интеграции стран ЕврАзЭС (круглый стол Евразийского Банка Развития), сборник докладов, Москва, 15-16 мая 2008 г., с. 27-33.
3. Дабаев А.И., Мухамедяров Р.Д., Туманов В.Р. Метод видеотепловизионной генерализации и его геолого-геофизическое значение. Нефть и газ, № 2(62), 2011, с. 39-48.
4. Мухамедяров Р.Д. К использованию метода видеотепловизионной генерализации при поисках месторождений природного битума. Нефть и газ, № 2(62), 2011, с. 51-59.
5. Мухамедяров Р.Д. Геотехногенная обстановка г. Казани, представленная в эвклидовом пространстве 4D. Труды 20-ой Международной научно-технической конференции «Современные телевидение и радиоэлектроника», Москва, ФГУП «МКБ Электрон», 20-21 марта 2012 г., с. 346-354.

УДК 621.384.326

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МВТГМ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ГЕОСТРУКТУРЫ 3D - 4D г. КАЗАНИ

Р.Д. Мухамедяров, *m.robert17@mail.ru*
ЗАО «Институт аэрокосмического приборостроения», г. Казань

Метод видеотепловизионной генерализации Мухамедярова (МВТГМ), предложенный автором, относится к числу тех немногих инновационных супертехнологий, практическое применение которых может предсказать стихийные бедствия и предотвратить геотехногенные катастрофы.

По результатам космической съемки г. Казани и его окрестностей с использованием технологии MVTGM восстанавливается глубинное строение фундамента города в евклидовом пространстве 4D. Показаны практическое применение этой технологии для сохранения культурного центра города.

APPLICATION OF MVTGM TECHNOLOGY TO DESCRIBE 3D - 4D GEOSTRUCTURE OF KAZAN

R.D. Mukhamedyarov, *m.robert17@mail.ru*
CJSC "Institute of aerospace instrumentation, Kazan

Mukhamedyarov's video thermal vision generalization method (MVTGM), proposed by the author, is one of the few innovative super technologies, practical applications of which can predict natural disasters and prevent geo anthropogenic disasters .

According to the results of satellite survey of Kazan and its surroundings using MVTGM technology deep structure of the foundation of the city is restored in the Euclidean 4D space. The practical application of this technology for the preservation of the cultural center of the city is shown.

Сегодня в период мирового кризиса аэрокосмическое дистанционное зондирование Земли с авиационных и космических носителей является не только наиболее быстрорастущим сегментом аэрокосмической промышленности в наиболее промышленно развитых странах [1], но и может стать одним из инструментов выхода из этого кризиса.

Появление новых фундаментальных идей и инновационных супертехнологий в этом зарождающемся сегменте Евроазиатской интеграции скорее закономерность [1-3], но требует очень большой координации сил и ресурсов, как в странах СНГ, так и в мировом сообществе.

Метод видеотепловизионной генерализации Мухамедярова (МВТГМ), предложенный мною, относится к числу тех немногих инновационных супертехнологий, практическое применение которых может видоизменить нынешнюю цивилизацию, предсказать стихийные бедствия и предотвратить геотехногенные катастрофы [3].

Для того, чтобы предсказать (экстраполировать) будущее, необходимо хорошо научиться описывать (интерполировать) прошлое.

Рассмотрим применение технологии МВТГМ для описания геоструктуры 3D г. Казани (Котел по-тюрски) и его окрестностей в прошлом не более 1 млн. лет с нынешнего времени и возможные варианты развития в ближайшем будущем.

Геоструктура г. Казани и его окрестностей на глубине 10 м соответствует настоящему времени по геологическому исчислению.

На рис. 1 приведена блоково-разломная структура г. Казани с окрестностями на глубине h=2130 м, то есть на фундаменте, из этой геоструктуры видно, что город расположен на трех сублоках.

Первый сублок – северный, основание почти прямоугольник, определен с запада древним разломом-руслом реки Свияга, с юга – нынешним руслом реки Волга (Идель), с севера разломом - древним руслом Палео Волги.

Второй сублок простирается с юга-запада с нынешнего русла реки Волга (Идель) на северо-восток под углом 45^0 , юго-восточной границей которой служит нынешнее русло реки Казанка.

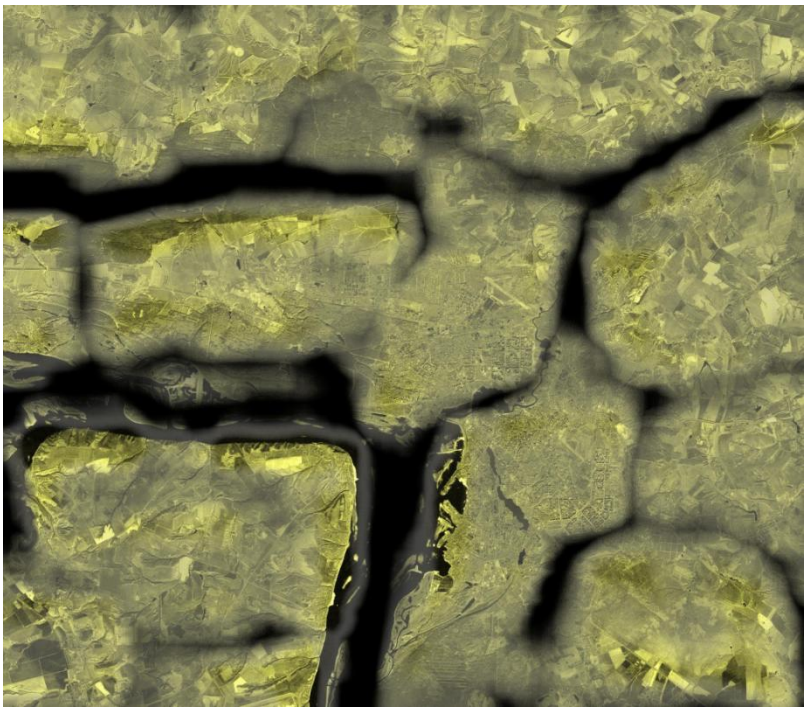


Рис. 1. Landsat-7 (ETM+). TIR. Слой 071. H = 2130 м.

Третий сублок расположен на левом берегу реки Волга (Идель) и простирается с севера на юг, северной границей является нынешнее русло реки Казанка.

Расположение этих сублоков и дальнейшее их дробление показывают, что организация геопространства в районе г. Казани имеет иерархическую структуру, при этом разноуровневые элементы этих сублоков обнаруживают признаки поступательного и вращательного движений. При этом оба типа движения находятся в соподчиненных иерархических отношениях.

Вектор движения северной части сублоков направлен строго на восток, южная часть сублоков строго с севера на юг, то есть поступательные, а среднее промежуточное делает поворот – вращение по часовой стрелке.

Деформация геометрических размеров этих сублоков в пространстве 2D и 3D сопровождается перестройкой во времени их геоструктур в пространстве 4D.

Геоструктура г. Казани с окрестностями по модели технологии МВТГМ, как у нас показано, дискретно-непрерывна и имеет иерархическую вложенную структуру, части которой находятся в силовом воздействии.

В связи с этим появляются неотектонические разломные зоны, дополнительно разделяющие эти сублоки. В силу активности большинство разломов могут оказаться геопатогенными и составляют объект мониторинга эндогенных и экзогенных термодинамических геотехногенных процессов.

Аккумулятивные поверхности изучаемого района относятся к средненеоплейстоценовым аллювиальным отложениям (пески с гравием и галькой, супеси, суглинки) 3-ей и 4-ой надпойменных террас по левому берегу реки Волга, а по правому высокому берегу реки Волга – к ранненеоплейстоценовым отложениям (140-160 м над уровнем моря) и эоплейстоценовым отложениям (180-240 м над уровнем моря) (рис. 1).

Долицкий А.В. [4] объясняет горизонтальное движение ядер U-структур их приподнятостью в условиях горообразования положения, и, как следствие, воздействием центробежных сил вращения Земли, смещающих их в сторону экватора; в условиях быстрых меридиональных смещений материка Евразия возникают Кариолесовы силы, способные вызвать его небольшие повороты, указывая при этом на вращение всей Азиатской структуры

в олигоцене по часовой стрелке.

Технология МВТГМ позволяет это рассматривать в пространствах 3D и 4D достаточно подробно, не рассматривая физическую природу образования таких геоструктур: возможно такие структуры отражают очертания мантийных ядер, образовавшихся на ранних этапах развития Земли.

Следует отметить, что поверхность мантии постоянно в ограниченных размерах меняет свою форму, отражая действующие на нее силы. Литосфера системами разломов и деформациями чехла осадочных пород сохраняет память обо всех прошедших деформациях [4]. То есть позволяет с помощью технологии МВТГМ реконструировать 4D, то есть рассказать, что было (интерполировать геологическое прошлое), что есть на сегодня – точка нашего отсчета в прошлое и настоящее, и что будет (экстраполировать будущее) с учетом глобальных техногенных воздействий цивилизации.

В связи с тем, что современная фаза развития геоструктур, связанная с формированием U структур и их смещением к экватору под действием центробежных сил вращения Земли близка к завершению, будем реконструировать прошлое не более одного миллиона лет.

Для этого примем за гипотезу, что за последние 770 тыс. лет движение - смещение к экватору, то есть к югу в районе левобережья реки Волга севернее г. Казани от Палео Волги до нынешнего русла в среднем составляет 14,4 км и смещение происходило со скоростью $V_м$=20 мм/год (рис. 1), тогда региональное движение по часовой стрелке в районе левобережья реки Волга южнее г. Казани с Востока на Запад составляет за это же время (Т=770 тыс. лет) 12,2 км и средняя скорость движения составляет $V_{вз}$=15,84 мм/год против движения Евроазиатской плиты с Запада на Восток (рис. 1).

За это же время Т=770 тыс. лет движение Северной плиты с Запада на Восток, то есть согласно движению Евроазиатской плиты составило по древнему руслу Палео Свияги, текущему с юга на север, составило 3,6 км и средняя скорость движения составляет $V_с$=4,6 мм/год (рис. 1).

Все описанное относилось к данным геоструктуры слоя-ступени N=71, что соответствует к глубине Н=2130 м и масштабу М 1:200000.

Палео Волга на Северном блоке приблизилась к нынешнему руслу на 10 км, на Восточном блоке на 3 км к нынешнему руслу реки Волга и на расстоянии 1-2 км от цепи озер-водохранилищ Нижний, Средний и Верхний Кабан, которые вместе составляют дугу, выгнутую в восточном направлении, скорость движения которой при этом уменьшилась в 2-2,5 раза.

Для города Казани и его исторического центра в районе Кремля и Татарской слободы большое значение имеет неотектоническая разломная зона, простирающаяся с севера-запада на юго-восток через поселок Северный Залесный, озеро Глубокое, древнее русло Казанки, Булак, Нижний, Средний и Верхний Кабан.

Как иллюстрируется данными, представленными на рис. 1 фундамент г. Казани опущен и находится на глубине порядка h=2 км и центр котла-казана находится на расстоянии порядка 650 м к северо-востоку от Верхнего Услона.

В связи с действием Кариолисовых сил реки, текущие в Северном полушарии, имеют высокий правый берег, в связи с этим и вышесказанным исторический центр г. Казани находится в низине - в котле, причем опускание происходит и сейчас со скоростью 6-8 мм в год. Этот котел-казан занимает три четверти, а четверть – высокий район Печищ и Верхнего Услона – вдвигается в этот котел.

Развитие строительного комплекса, особенно при создании крупных городских агломераций и сохранения объектов культурного наследия, требует проведения комплекса специальных исследований тектонических структур и их движений как самостоятельного вида опасных геологических объектов и процессов.

Особенность данных исследований заключается в том, что они практически не нашли должного отражения в нормативно-методической литературе по инженерным изысканиям

для строительства.

Методология (система и последовательность конкретных методов геологических, геоморфологических, аэрокосмических, геофизических и геодезических исследований) их не разработана и соответствующие направления исследований не нашли должного внедрения в практику инженерных изысканий.

До настоящего времени считалось, что регионы выделяются по структурно-тектоническому, области – по геоморфологическому, а районы – по литолого-генетическим признакам.

Новейшие аэрокосмические исследования по технологии МВТГМ выявили общность и единство того, что многие геоморфологические и даже литолого-генетические элементы являются структурно обусловленными, и все основные элементы рельефа обусловлены неотектоникой. Таким образом, являются новейшими тектоническими структурами.

Все это можно учесть при разработке дробной системы таксономических единиц инженерного геологического районирования применительно к районированию таких больших мегаполисов, как город Казань.

В системе, основанной на предложенной автором технологии МВТГМ, удается показать существенную роль неотектоники в инженерно-геологическом районировании всех масштабных уровней и возрастающую необходимость изучения разрывных структур и блоковых сочленений с уточнением масштаба районирования.

Комплексное изучение районов г. Казани, подверженных воздействию природно-техногенных сил, имеет как историческое значение, так и новейшее практическое прикладное значение.

Интенсивность сейсмического воздействия природно-техногенных сил определяется особенностями локальной тектоники, грунтовогидрогеологическими и геоморфологическими условиями. Изменение поверхности акватории Куйбышевского водохранилища прямо сказывается на положении уровня грунтовых вод в Татарской слободе, да и в центре г. Казани (на кольце), так как гидравлическая связь акватории Куйбышевского водохранилища и водосодержащей толщи отложений прямая и сказывается на состоянии подземных и наземных инженерных сооружений г. Казани.

Колебания грунтовых вод составляет более двух метров в течение 5-ти последних лет относительно проектного уровня Куйбышевского водохранилища (53 м), что приводит к изменениям состояния и свойств грунтов, как водовмещающей, так и вышележащих слоев до поверхности земли и сказывается на состоянии зданий и других инженерных сооружений в г. Казани.

Колебания уровня Куйбышевского водохранилища в связи с аномально холодными зимами и аномально жарким летом могут инициировать природно-техногенную наведенную сейсмичность, при заполнении или при резком спуске Куйбышевского водохранилища через неотектонические разломные зоны, которые в районе г. Казани, то заполняются, то опустошаются в приповерхностном слое, то есть создают динамическую цикличность воздействия на здания, представляющие историческую ценность.

На рис. 2 приведен синтезированный снимок (блоково-разломные структуры), сделанный по технологии МВТГМ с аппаратуры «Landsat-7».

На нем отчетливо видны разломные зоны, проходящие по зданию президентского дворца, по зданию арбитражного суда, между зданием мэрии города и Кремлем по улице Кремлевской, парка Черного озера и прилегающих к нему зданий, в том числе Петропавловского собора

В докладе на Международной форуме «Цифровые технологии в системе инноваций в сфере сохранения культурного наследия», г. Казань, 6-8 октября 2010 г. и в интервью телеканалу «Татарстан – новый век» 7 октября 2010 г. автор предсказал, что разломная зона, проходящая через президентский дворец в Кремле, по зданию Арбитражного суда, между зданием мэрии города и Кремлем по улице Кремлевской, парка Черного озера может проявить себя в ближайшие полгода.

Проявление этого разлома в виде провала между зданием мэрии города и Кремлем по улице Кремлевской диаметром 10 м и глубиной 8 м произошло 9 декабря 2010 г. Несмотря на проведенные ремонтно-восстановительные работы, зона разлома продолжается как в сторону территории Кремля, так и здания мэрии.

Рис. 2 Снимок синтезированного изображения г. Казани (исторический центр), наложенный на снимок высокого разрешения. Слой 05, H=50 м

На этом же снимке (рис. 2) четко видны древнее русло реки Казанки и места разломных зон – зон проникновения через защитные дамбы вод Куйбышевского водохранилища в исторический центр г. Казани.

Эти примеры показывают работоспособность и практическую значимость технологии МВТГМ для решения геотехногенных проблем.

Используя технологию МВТГМ можно построить объемный портрет 3D геолого-геофизической подосновы исторического центра г. Казани, также выбора новых строительных площадок в пригородах, которые, как известно, относятся к зоне неустойчивого увлажнения, характеризуется неустойчивым соотношением прихода и расхода влаги.

Таким образом, очень конспективно на примере геотехногенных проблем строительства и сохранения культурного наследия г. Казани мы показали геологические структуры 2D, 3D и 4D по технологии МВТГМ.

Список литературы

1. Мухамедяров Р.Д. «ОКО ЗЕМЛИ — ВСЁВИДЯЩИЙ ГЛАЗ» - глобальная аэрокосмическая система дистанционной геотермической интроскопии. Труды 18-ой Международной научно-технической конференции «Современные телевидение и радиоэлектроника» ФГУП «МКБ Электрон», 16-17 марта 2010 г., с. 271-280.

2. Мухамедяров Р.Д. Метод видеотепловизионной генерализации при решении геотехногенных задач. Труды 18-ой Международной научно-технической конференции «Современные телевидение и радиоэлектроника», Москва, ФГУП «МКБ Электрон», 16-17 марта 2010 г., с. 280-287.

3. Мухамедяров Р.Д. Метод видеотепловизионной генерализации для исследования и выявления геотехногенных проблем г. Казани. Труды 19-ой Международной научно-технической конференции «Современные телевидение и радиоэлектроника», Москва, ФГУП «МКБ Электрон», 15-16 марта 2011 г., с. 333-342.

4. Долицкий А.В. Вращение мантии по ядру: движение географических и геомагнитных полюсов, периодичность геологических и тектонических процессов. РАН. Москва. 2000, 42 с.

УДК 550.21:550.83(571.642)

ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИЙ ЕСТЕСТВЕННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НАД ЗАЛЕЖЬЮ УГЛЕВОДОРОДОВ

В.А. Паровышный, В.Н. Сеначин, Ю.В. Сохатюк, А.И. Казаков, О.В. Веселов, Е.В. Кочергин,
v.parovyshny@imgg.ru
Институт Морской Геологии и Геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Аннотация. Рассматриваются результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение вариаций естественных геофизических полей над залежью углеводородов. Изложены основы методики оценки степени продуктивности поисковых объектов. Оценена возможность создания методики оперативного прогноза сейсмических событий.

Ключевые слова: гравиметрия, термометрия, магнитометрия, естественное электрическое поле, залежь УВ.

FEATURES OF NATURAL VARIATIONS OF GEOPHYSICAL FIELDS OF HYDROCARBON DEPOSITS

V.A. Parovyshny, V.N. Senachin, Y.V. Sokhatyuk, A.I. Kazakov, O.V. Veselov, E.V. Kochergin
v.parovyshny@imgg.ru
Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

The results of experimental studies aimed at studying of natural variations of geophysical fields of hydrocarbon deposits. The foundations of the methodology for assessing the degree of efficiency poiskoayh objects. Estimated possibility of creating a methodology, operational forecasting of seismic events.

*Keyword*s: gravimetry, thermometers, magnetometry, natural-cal electric field of hydrocarbon deposits

Лаборатория геодинамики ИМГиГ ДВО РАН приступила к изучению характера временных изменений естественных геофизических полей над залежью газа в 2003 году. С этой целью был обустроен геофизический полигон на Южно-Луговском месторождении газа (рис.1).

Выбор места заложения полигона не случаен. Предпочтение отдано по следующим основным причинам. Исполнителям было известно о нестабильности гравитационного поля в районе данного месторождения и расположении его в зоне влияния активного регионального Центрально-Сахалинского разлома (показан на врезке рис. 1А).

В начале исследований ставились две задачи:

1) Выявить характерные признаки наличия залежи углеводородов (УВ) по временным изменениям естественных геофизических полей; и на этой основе разработать методику оценки степени продуктивности в нефтегазоносном отношении сложно построенных перспективных объектов.
2) Определить связи временных изменений естественных геофизических полей над газонасыщенными объектами с сейсмическими событиями; и оценить возможности создания методики краткосрочного прогноза землетрясений.

Первая задача была решена в течение трех полевых сезонов. Создана поисковая методика [1,2,3], которая успешно апробирована в 2008 г. на Петропавловской площади (Анивский район Сахалинской области), где, с учетом наших рекомендаций пробурена поисковая скважина, вскрывшая залежь метана в отложениях маруямской свиты миоцена.

Методика основана на устойчивых признаках продуктивности, выявленных в ходе исследований:

1) Гравитационное поле над залежью нестабильно во времени. Величина нестабильности, регистрируемая между циклами наблюдений, достигает 0,19-0,20 мГал;
2) Залежь УВ в температурном поле выражена относительными максимумами, которые совмещаются в плане с максимумами нестабильности гравитационного поля.

3) Гравитационное и температурное поля над залежью меняют характеристики синхронно. Повышению уровня гравитационного поля соответствует повышение уровня термального и наоборот, понижение одного соответствует понижению другого.

4) При прохождении естественного сейсмического импульса температурное поле над залежью повышается.

Решение второй задачи осуществлялось параллельно с решением первой и продиктовано полученными в ходе исследований материалами, убеждающими в том, что возмущения естественных геофизических полей над залежью газа однозначно связаны с сейсмическими событиями; а начало возмущений предшествует событиям за несколько часов до их реализации.

Методика исследований

Для решения поставленной задачи (определение характера связи временных изменений геофизических полей с сейсмическими событиями и выявление предвестников для оперативного прогноза землетрясений) использовались электрометрический (метод естественного электрического поля), термометрический и магнитометрический методы. Первые два метода применялись в стационарной и профильной модификации; магнитометрический – только в стационарной. Параллельно с решением данной задачи продолжались исследования с целью совершенствования методики поисков месторождений углеводородного сырья, разработанной нами в период с 2003 по 2006 год.

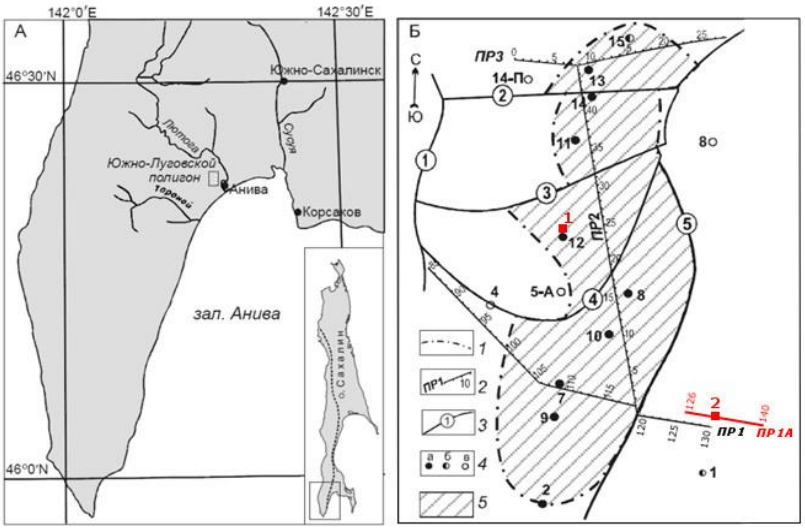


Рис. 1. Географическое положение (А) и структурная схема полигона (Б). Условные обозначения: 1 – контур газовой залежи; 2 – профили комплексных геофизических наблюдений; 3 – основные разрывные нарушения по данным сейсморазведки и бурения; 4 – скважины: а – с промышленными притоками, б – с непромышленными притоками, в – непродуктивные; 5 – площадь залежи. На врезке рис.1А показано положение Центрально-Сахалинского разлома. Расстояние между пикетами на профилях – 50 метров, на профиле 1А -25 метров. Красные квадраты 1 и 2 – места расположения стационарных пунктов.

Стационарные наблюдения

Метод естественного электрического поля (далее ЕП). На стационарных пунктах 1 и 2 использовались шести азимутальные дипольные установки и автоматические цифровые компьютеризированные станции, позволяющие регистрировать текущие значения ЕП в микровольтах с дискретностью 10 секунд по каждому каналу с точностью ± 0,5 мкв. Диполи установок ориентированы по истинным азимутам через 30 градусов. Длина разносов диполей (от 370 до 520 м) определялась достижением примерно равных условий заземления (одинаковыми условиями обводненности и освещения мест заземления). Для заземлений применялись неполяризующиеся стержневые электроды, которые погружались в шпуры на глубину 1,5 м. Результаты наблюдений регулярно просматривались на компьютере, периодически архивировались.

Геомагнитные наблюдения осуществлялись протонными модернизированными магнитометрами ММП-203. Модернизация заключалась в подключении к магнитометру дополнительного электронного блока объединяющий систему управления с программным обеспечением и накопитель емкостью 4Гб. Регистрация отсчетов производилась с дискретностью 1 минута, точность наблюдений ± 1 нТл.

Термометрические наблюдения выполнялись так же автоматизированной и компьютеризированной станцией. Станция позволяет регистрировать в автоматическом режиме температуру по трем каналам: атмосферное давление, температуру воздуха и влажность. Термометрические наблюдения выполнялись от датчиков, погруженных в скважины. На пункте 1 глубина погружения датчика 3.2 м, на пункте 2 – 2.9 м. Точность определения температур ± 0.05^{o}C, дискретность записи – 15 минут.

Профильные наблюдения

На профиле 1А, (рис.1Б), протяженность которого составила 700 м, выполнены термометрические наблюдения и наблюдения методом естественного электрического поля в модификации метод потенциала. Планируемые здесь гравиметрические наблюдения не выполнены по техническим причинам.

Термометрические наблюдения выполнены электронным цифровым регистратором, спроектированным и изготовленным ст. инженером отряда Ю.В. Сохатюком. Измерения производились от датчиков ТЭТ-2, запрессованных в алюминиевые трубки длинной 1.5 м, которые были погружены в шпуры такой же глубины. Расстояние между пунктами наблюдений 25 м, точность определения температур ± 0.05^{o} С.

Наблюдения методом потенциала выполнены электроразведочной станцией «Электротест-С» с дипольной установкой при заземлении неполяризующимися стержневыми электродами в шпурах глубиной 1.5 м. Шаг наблюдений 25 м, точность определения разности потенциалов ± 1мв. Неподвижный электрод установлен в 10 м западнее пикета 128, подвижный - перемещался по профилю после взятия отсчетов.

Электрометрические и термометрические наблюдения выполнялись циклами последовательно в один день. Всего выполнено 9 циклов. По результатам наблюдений получены семейства кривых t^0 С и $\Delta U_{ЕП}$, а также – кривые последовательных разностей, которые коррелируются между собой над предполагаемым продуктивным блоком разреза.

Краткие результаты исследований

Предыдущими исследованиями (2006 – 2013 год) нами было показано, что возмущения естественных геофизических полей перед сейсмическими событиями начинаются над залежью газа, расположенной в зоне влияния активного регионального Центрально-Сахалинского разлома (врезка на рис. 1А). Этими же исследованиями была показана возможность определения времени предстоящего сейсмического события и намечены пути решения задачи определения направления от места наблюдений на эпицентры предстоящих сейсмических событий. В полевой сезон 2014 года получены материалы, подтверждающие правильность подхода к решению этой задачи. В процессе эксперимента записано более 100 эпизодов реакции естественных геофизических полей, каждый из которых характеризует как процесс подготовки сейсмического события, так и его реализацию с последующим затуханием процесса. По мере поступления материалов наблюдений определились основные закономерности временных изменений естественного поля в период подготовки и реализации сейсмических событий:

1. При отсутствии сейсмических событий (спокойная сейсмологическая обстановка) геофизические поля находятся в спокойном состоянии без видимых отклонений от фона.
2. Возмущения геофизических полей над залежью метана регистрируются за 3-4 часа до сейсмического события, если его эпицентр удален от пункта наблюдений на 450 км и более и, примерно за 20 -25 часов, если эпицентр удален на 100 км и менее. При удалении эпицентра более чем на 650 км, время предстоящего события определяется неуверенно.

3. В конечную стадию подготовки сейсмического события наибольшие возмущения естественного электрического поля регистрируются по каналам, ориентированным азимутально близко по направлению на эпицентр.

К пункту 2 следует сделать следующее дополнение. На рис.2 показана запись реакции естественного электрического поля на сильное землетрясение в акватории Охотского моря. 14 августа 2012 года (параметры события на графике). Данная запись резко отличается от всех регистрируемых ранее. Здесь возмущения поля начались ранее чем за 50 часов до реализации события и при четко выраженной поканальной дифференциации (кроме канала 2, ориентированного на эпицентр). Наиболее амплитудный сигнал получен по каналу 6, диполь которого ориентирован почти ортогонально второму. Такая форма записи, время поступления полезного сигнала и другие особенности регистрируются нами впервые, как впрочем, и само событие такого класса.

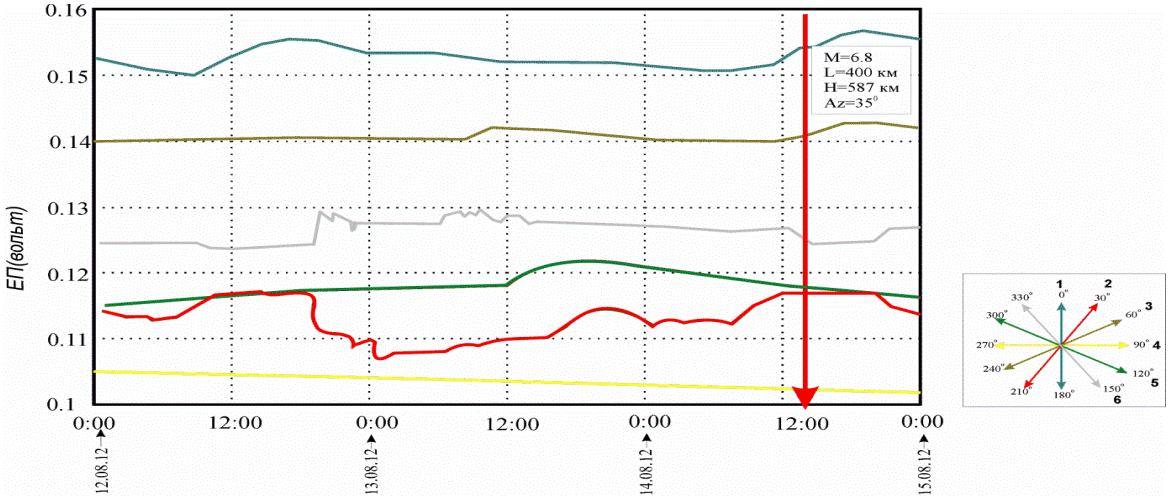


Рис 2. Пример возмущения естественного электрического поля перед сильным землетрясением 14 августа 2012 г. в 14 часов 00 мин в Охотском море, восточнее о-ва Сахалин.

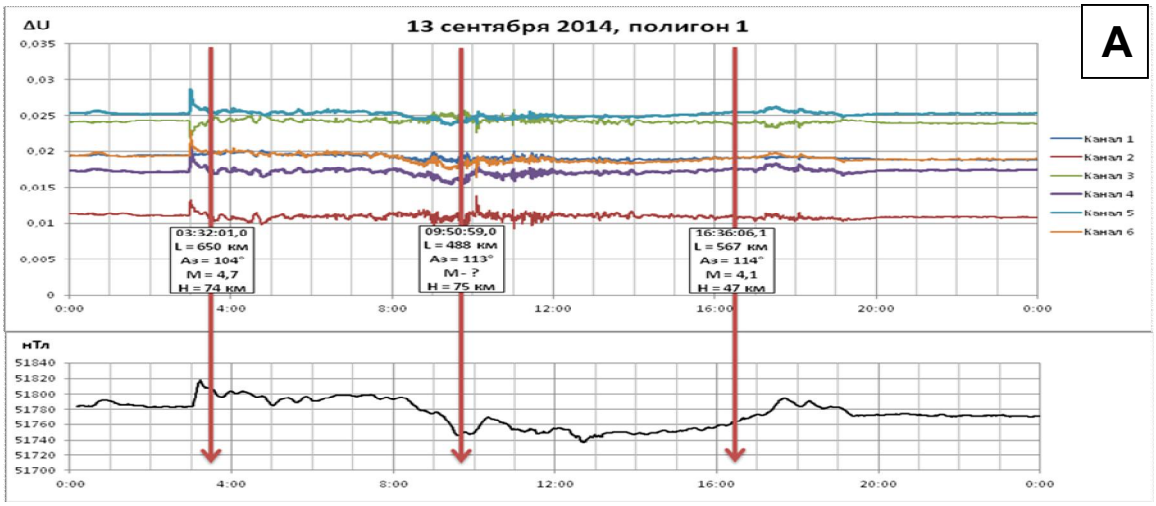


Рис.3. Пример реакции ЕП (А) и геомагнитного поля (Б) в период подготовки и реализации трех сейсмических событий 13.09. 2014 г., восточнее о-ва Итуруп.

Ниже приводятся примеры реакции естественного электрического (ЕП) и геомагнитного полей на подготовку сейсмических событий.

На приведенных графиках красными вертикальными стрелками показано время сейсмических событий, L-расстояние от места наблюдений до эпицентра данного события, Аз.- истинный азимут от места наблюдений на эпицентр, М – магнитуда события, Н – глубина очага. Азимуты и расстояния от места наблюдений до эпицентра вычислены по координатам эпицентров и мест расположения установок. Координаты, время, магнитуда и глубина очага

взяты из официальных каталогов сейсмологической службы Сахалина. На рисунке 3 показано, что возмущения естественного электрического и геомагнитного полей начинаются за некоторое время раньше, чем происходит реализация сейсмических событий. Наиболее амплитудные изменения (рис. 2, 3) наблюдаются по каналам, диполи которых ориентированы близко по направлению на эпицентры событий. Исключение составляет событие, произошедшее 24 сентября в 07 часов 10 минут местного времени (рис.4), которое не отразилось в ЕП. Причина, вероятнее всего, в большой удаленности эпицентра и сравнительно малой магнитуде данного события. Следует отметить еще одну особенность в характере возмущений ЕП. Если события следуют друг за другом менее чем за 5-6 часов, то на кривых ЕП хорошо выражено только первое событие, редко – второе и, практически, не выражены последующие.

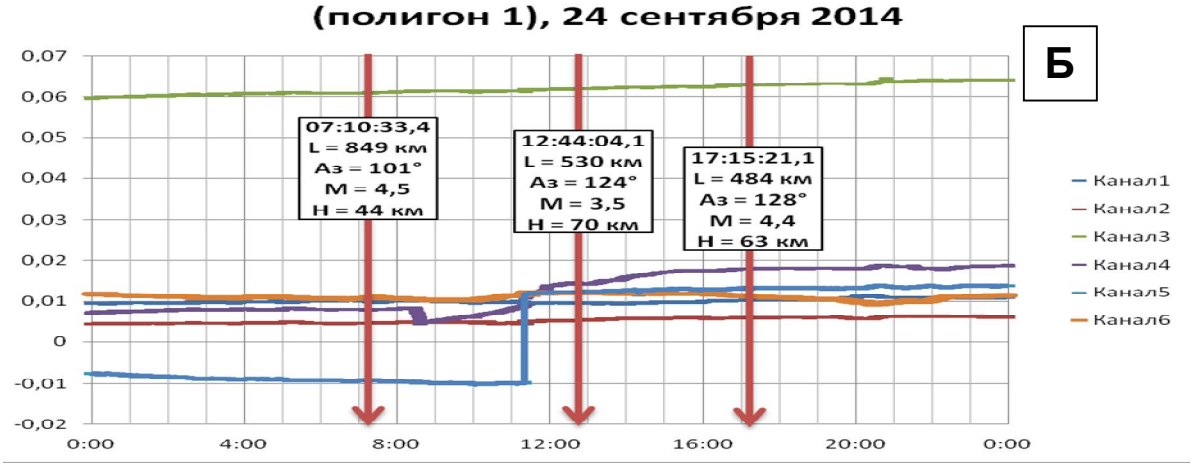


Рис.4. Пример реакции ЕП на серию сейсмических событий 24 сентября 2014 года.

Выводы

1. Разработанная методика обнаружения залежи УВ прошла апробацию. По результатам обследования антиклинальной структуры на лицензионной Петропавловской площади вскрыта залежь метана. Методика применима в любых орографических условиях, могут быть обследованы и оценены любые типы ловушек с любым типом сжимаемого флюида.
2. Разработки в области оперативного прогноза сейсмических событий к настоящему времени позволяют определять время предстоящих событий с точностью до 30 минут не позднее 4 часов до события.
3. Введение в практику наблюдений многоазимутальной установки за наблюдением вариаций естественного электрического поля позволяет определить направление от места наблюдений на очаг предстоящего сейсмического события.
4. Очевидно, что обустройство трёх геофизических полигонов, расположенных на удалении не менее 250 км друг от друга позволит определить координаты эпицентров предстоящих сейсмических событий методом засечек.

Изложенное требует следующего примечания: описанные эффекты вариаций естественных геофизических полей наблюдаются только над залежью УВ.

Литература

1. Паровышный В.А., Веселов О.В. Сеначин В.Н., Кириенко В.С. Временные изменения геофизических полей над газовой залежью (о. Сахалин) //Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 4. С. 3-14.
2. Паровышный В.А., Сеначин В.Н., Веселов О.В., Кочергин Е.В. Вариации геофизических полей над флюидонасыщенными геодинамическими системами в связи с проблемой прогноза сейсмических событий //Вестник ДВО РАН, 2009, №4, с.-50-58.
3. Parovyshny V.A., Senachin V.N., Veselov O.V., Kochergin E.V. Temporal variations in geophysical fields and earthquake forecasting issues //Geodynamics & Tectonophysics – 2015. - Vol. 6. – Issue 1. – P. 63-76.

УДК 550.831.01

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА ПРИ РЕШЕНИИ ПРЯМОЙ ТРЕХМЕРНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ ГЕОТЕРМИИ В УСЛОВИЯХ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРОД ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

***Ю.В. Пятаков**, pyatakovjv@mail.ru*

Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

Аннотация. Рассмотрена математическая постановка и алгоритм решения прямой задачи геотермии в условиях зависимости теплопроводности пород от температуры. Решение получено путем сведения решения граничной задачи для системы уравнений теплопроводности к решению системы интегральных уравнений.

USING THE METHODS OF POTENTIAL THEORY FOR SOLVING THE THREE-DIMENSIONAL STATIONARY DIRECT PROBLEM OF GEOTHERMY, CONSIDERING THE DEPENDENCE OF THERMAL CONDUCTIVITY ON TEMPERATURE

***Y.V. Pyatakov**, pyatakovjv@mail.ru*

Voronezh State University of Engineering Technology, Voronezh, Russia

Abstract. The are considered the mathematical formulation and the algorithm of solution of the direct problem of Geothermy in conditions of depending the coefficient of thermal conductivity by the temperature. The solution is obtained by adduction of the solution of the boundary problem for the heat equation to a system of integral equations.

Моделирование глубинных геотермических процессов связано с решением систем уравнений теплопроводности. Теоретические аспекты решения данных уравнений рассмотрены в работах [1-3]. В работе [4] отмечено, что арсенал средств, применяемых в теории геотермии, может быть существенно расширен с помощью приемов, развитых в теории потенциала и применяемых в гравиметрии и магнитометрии. В работе [5] рассматривалась постановка и алгоритм решения прямой задачи геотермии для трехмерной неоднородной среды с кусочно-постоянными значениями теплофизических параметров. В качестве метода решения в [5] использовались методы теории потенциала.

При построении моделей глубинных геотермических процессов возникает необходимость учитывать зависимость теплопроводности пород от температуры. Характер этой зависимости обычно бывает представлен аппроксимационными выражениями вида $\lambda = \lambda(T)$. Рассмотрим решение задачи геотермии для случая, когда коэффициент теплопроводности зависит от температруры

Постановка и алгоритм решения прямой задачи геотермии.

Рассмотрим решение уравнения теплопроводности

$$\nabla(\lambda(\boldsymbol{x})\cdot\nabla T(\boldsymbol{x}))+ f(\boldsymbol{x})=0, \quad \boldsymbol{x}\in D\setminus\partial D \tag{1}$$

для однородной области D. В (1) $T(\boldsymbol{x})$ - значение температуры, $f(\boldsymbol{x})$ - значение плотности внутренних источников тепла, $\lambda(\boldsymbol{x})=\lambda(T(\boldsymbol{x}))$-значение коэффициента теплопроводности в точке $\boldsymbol{x}$; ∂D-граница области D, ∇-оператор Гамильтона.

Уравнение (1) необходимо дополнить граничными условиями, которые определим следующим образом: пусть $\partial D = S_1 \cup S_2$.

На поверхности S_1 считаем заданным *значение температуры*

$$T(\boldsymbol{x})=T^{(1)}(\boldsymbol{x}),\ \boldsymbol{x}\in S_1. \tag{2}$$

На поверхности S_2 полагаем заданным *значение теплового потока* $q(\boldsymbol{x})$:

$$\lambda(\boldsymbol{x})\cdot T(\boldsymbol{x})/\partial\boldsymbol{n}=q(\boldsymbol{x}),\ \boldsymbol{x}\in S_2; \tag{3}$$

$\boldsymbol{n}=\boldsymbol{n}(\boldsymbol{x})$ - вектор внешней нормали к поверхности ∂D в точке $\boldsymbol{x}$. Под решением прямой задачи понимается задача определения функции $T(\boldsymbol{x})$, удовлетворяющей соотношениям (1)-(3).

Решение системы уравнений (1)-(3) определим следующим образом: пусть зависимость $\lambda = \lambda(T)$ определена в диапазоне $[T_0, T_1]$, при этом искомое значение температуры принадлежит указанному диапазону. Введем в рассмотрение функцию $\Lambda(T)$, определенную следующим образом:

$$\Lambda(T) = \int_{T_0}^{T} \lambda(\tau) d\tau . \qquad (4)$$

Поскольку коэффициент теплопроводности $\lambda(T) > 0$, функция $\Lambda(T)$ будет непрерывной и монотонной на отрезке $[T_0, T_1]$, следовательно существует обратная ей функция $\Lambda^{-1}(s)$, где s некоторый элемент из множества значений $\Lambda(T)$.

С учетом введенных обозначений система уравнений (1)-(3) примет вид уравнения Пуассона:

$$\Delta\Lambda(\boldsymbol{x}) + f(\boldsymbol{x}) = 0, \quad \boldsymbol{x} \in D, \qquad (5)$$

с граничными условиями

$$\Lambda(\boldsymbol{x}) = \Lambda^{(1)}(\boldsymbol{x}), \ \boldsymbol{x} \in S_1 , \qquad (6)$$

$$\Lambda(\boldsymbol{x}) / \partial \boldsymbol{n} = q(\boldsymbol{x}), \ \boldsymbol{x} \in S_2 ; \qquad (7)$$

где $\Delta = \nabla^2$ - оператор Лапласа; $\Lambda(\boldsymbol{x}) = \Lambda(T(\boldsymbol{x}))$; $\Lambda^{(1)}(\boldsymbol{x}) = \Lambda\left(T^{(1)}(\boldsymbol{x})\right)$.

Таким образом, введение функции $\Lambda(T)$, определенной соотношением (4) позволяет свести решение исходной *квазилинейной* системы уравнений (1)-(3) к решению *линейной* системы уравнений (5)-(7), которое может быть получено с помощью методов теории потенциала [5]. Пусть $\Lambda(\boldsymbol{x}) = s(\boldsymbol{x})$ является решением системы уравнений (5)-(7). Тогда решение системы уравнений (1)-(3) определяется выражением

$$T(\boldsymbol{x}) = \Lambda^{-1}(s(\boldsymbol{x})) . \qquad (8)$$

Теперь рассмотрим постановку и алгоритм решения прямой задачи геотермии для неоднородной области D. Будем полагать, что моделируемый объект D представлен совокупностью N слоев D_n ($D = \bigcup_{n=1}^{N} D_n$), при этом для каждого слоя заданы значения коэффициентов теплопроводности в виде соотношений $\lambda = \lambda_n(T)$. Для аппроксимации пространственного расположения слоев используем систему типовых аппроксимирующих элементов так, как это осуществляется при решении задач интерпретации гравитационных и магнитных полей [5,6].

Тогда уравнение теплопроводности примет вид системы уравнений:

$$\nabla(\lambda(\boldsymbol{x}) \cdot \nabla T(\boldsymbol{x})) + f_n(\boldsymbol{x}) = 0, \quad \boldsymbol{x} \in D_n, \qquad (9)$$

где $\lambda(\boldsymbol{x}) = \lambda_n(T(\boldsymbol{x}))$ - значение коэффициента теплопроводности в точке $\boldsymbol{x}$; $f_n(\boldsymbol{x})$ - значение плотности внутренних источников тепла в D_n.

Граничные условия будут иметь следующий вид

$$T(\boldsymbol{x}) = T^{(1)}(\boldsymbol{x}), \ \boldsymbol{x} \in S_1 . \qquad (10)$$

$$\lambda(\boldsymbol{x}) \cdot T(\boldsymbol{x}) / \partial \boldsymbol{n} = q(\boldsymbol{x}), \ \boldsymbol{x} \in S_2 ; \qquad (11)$$

$\boldsymbol{n} = \boldsymbol{n}(\boldsymbol{x})$ - вектор внешней нормали к поверхности ∂D в точке $\boldsymbol{x}$; $\lambda(\boldsymbol{x}) = \lambda_p(T(\boldsymbol{x}))$, p – номер слоя, граница которого в точке $\boldsymbol{x}$ совпадает с S_2.

На поверхности контактов смежных слоев D_n и D_{n+1} будем считать заданными *условия непрерывности значений теплового потока и температуры*:

$$\lambda_n(\boldsymbol{x}') \cdot \lim_{x' \to x} \partial T(\boldsymbol{x}') / \partial \boldsymbol{n}' + \lambda_{n+1}(\boldsymbol{x}'') \cdot \lim_{x'' \to x} \partial T(\boldsymbol{x}'') / \partial \boldsymbol{n}'' = 0 ; \quad \lim_{x' \to x} T(\boldsymbol{x}') = \lim_{x'' \to x} T(\boldsymbol{x}''), \qquad (12)$$

где $\boldsymbol{x}' \in D_n$, $\boldsymbol{x}'' \in D_{n+1}$; $\boldsymbol{n}' = \boldsymbol{n}'(\boldsymbol{x})$ и $\boldsymbol{n}'' = \boldsymbol{n}''(\boldsymbol{x})$ - соответственно, значения векторов внешних нормалей к ∂D_n и ∂D_{n+1} в точке $\boldsymbol{x} \in S_{2+n}$; $S_{2+n} = \partial D_n \cap \partial D_{n+1}$, n=1, 2, … , N.

Под решением прямой задачи геотермии будем понимать задачу определения функции $T(\boldsymbol{x})$, удовлетворяющей соотношениям (9)-(12).

Полагая, что зависимости $\lambda = \lambda_n(T)$ определены в некотором диапазоне $[T_0, T_1]$, введем в рассмотрение функции $\Lambda_n(T)$:

$$\Lambda_n(T) = \int_{T_0}^{T} \lambda_n(\tau) d\tau \,. \tag{13}$$

В этом случае, как было отмечено ранее, для функций $\Lambda_n(T)$ существуют обратные им функции $\Lambda_n^{-1}(s)$, где s некоторый элемент из множества значений $\Lambda_n(T)$.

С учетом введенных обозначений система уравнений теплопроводности (9) примет вид системы уравнений Пуассона:

$$\Delta \Lambda_n(\boldsymbol{x}) + f_n(\boldsymbol{x}) = 0, \quad \boldsymbol{x} \in D_n, \tag{14}$$

где $\Lambda_n(\boldsymbol{x}) = \Lambda_n(T(\boldsymbol{x}))$.

Граничные условия (12) примут вид

$$\Lambda(\boldsymbol{x}) = \Lambda^{(1)}(\boldsymbol{x}), \ \boldsymbol{x} \in S_1, \tag{15}$$

где $\Lambda^{(1)}(\boldsymbol{x}) = \Lambda_k\left(T^{(1)}(\boldsymbol{x})\right)$, k – номер слоя, граница которого в точке $\boldsymbol{x}$ совпадает с S_1.

Условия (11) будут иметь вид:

$$\Lambda_p(\boldsymbol{x}) / \partial \boldsymbol{n} = q(\boldsymbol{x}), \ \boldsymbol{x} \in S_2; \tag{16}$$

$\boldsymbol{n} = \boldsymbol{n}(\boldsymbol{x})$ - вектор внешней нормали к поверхности ∂D в точке $\boldsymbol{x} \in \partial D_p \cap S_2$.

Соответственно контактные условия (12) примут вид

$$\lim_{x' \to x} \partial \Lambda_n(\boldsymbol{x}') / \partial \boldsymbol{n}' + \lim_{x'' \to x} \partial \Lambda_k(\boldsymbol{x}'') / \partial \boldsymbol{n}'' = 0; \ \lim_{x' \to x} \Lambda_n^{-1}(\boldsymbol{x}') = \lim_{x'' \to x} \Lambda_k^{-1}(\boldsymbol{x}''). \tag{17}$$

Таким образом, задача нахождения функции $T(\boldsymbol{x})$, удовлетворяющей системе уравнений (9)-(12) сводится к задаче нахождения функции $\Lambda(\boldsymbol{x}) = \Lambda_n(\boldsymbol{x}), \boldsymbol{x} \in D_n$, удовлетворяющей системе (14)-(17) и связанной с искомой функцией $T(\boldsymbol{x})$ соотношением $T(\boldsymbol{x}) = \Lambda^{-1}(\boldsymbol{x})$. Для решения системы уравнений (14)-(17) будем использовать методы теории потенциала. На основании второй формулой Грина:

$$\int_{D_n} \Delta \Lambda_n(\boldsymbol{x}) \cdot G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) - \Delta G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) \cdot \Lambda_n(\boldsymbol{\xi}) d_\xi V = \int_{\partial D_n} \partial \Lambda_n(\boldsymbol{\xi}) / \partial \boldsymbol{n} \cdot G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) d_\xi S - \int_{\partial D_n} \partial G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) / \partial \boldsymbol{n} \cdot \Lambda_n(\boldsymbol{\xi}) d_\xi S$$

для функции $\Lambda(\boldsymbol{x}) = \Lambda_n(\boldsymbol{x}), \boldsymbol{x} \in D_n$, удовлетворяющей (14), в точках $\boldsymbol{x} \in D_n$ будет иметь место следующее представление:

$$k(\boldsymbol{x}) \cdot \Lambda(\boldsymbol{x}) = \int_{D_n} f_n(\boldsymbol{\xi}) \cdot G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) d_\xi V + \int_{\partial D_n} \partial \Lambda(\boldsymbol{\xi}) / \partial \boldsymbol{n} \cdot G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) d_\xi S - \int_{\partial D_n} \partial G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) / \partial \boldsymbol{n} \cdot \Lambda(\boldsymbol{\xi}) d_\xi S, \ \boldsymbol{x} \in D_n, \tag{18}$$

где $k_n(\boldsymbol{x}) = 1$, при $\boldsymbol{x} \in D_n$ и $k_n(\boldsymbol{x}) = 0$, при $\boldsymbol{x} \notin D_n$: $\boldsymbol{n} = \boldsymbol{n}(\boldsymbol{\xi})$ - вектор внешней нормали к ∂D_n;

$G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) = 1/(4\pi) \cdot |\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}|^{-1}$ - фундаментальное решение уравнения Пуассона: $\Delta G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) = -\delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi})$.

Просуммировав соотношения (18) по всем областям $D_n, n = 1,2,...,N$, получим выражение для функции $\Lambda(\boldsymbol{x})$:

$$\Lambda(\boldsymbol{x}) = \Lambda^{(1)}(\boldsymbol{x}) + \Lambda^{(2)}(\boldsymbol{x}) + \Lambda^{(3)}(\boldsymbol{x}), \quad \boldsymbol{x} \in D_n, \tag{19}$$

где $\Lambda^{(1)}(\boldsymbol{x}) = \sum_{n=1}^{N} \int_{D_n} f_n(\boldsymbol{\xi}) \cdot G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) d_\xi V$, $\Lambda^{(2)}(\boldsymbol{x}) = \int_{S_1} q(\boldsymbol{\xi}) \cdot G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) d_\xi S + \int_{S_2} q(\boldsymbol{\xi}) \cdot G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) d_\xi S$,

$$\Lambda^{(3)}(\boldsymbol{x}) = -\int_{S_1} \partial G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) / \partial \boldsymbol{n} \cdot \Lambda(\boldsymbol{\xi}) d_\xi S - \int_{S_2} \partial G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) / \partial \boldsymbol{n} \cdot \Lambda(\boldsymbol{\xi}) d_\xi S - \sum_{n=1}^{N-1} \int_{S_{2+n}} \partial G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\xi}) / \partial \boldsymbol{n} \cdot (\Lambda_{n+1}(\boldsymbol{\xi}) - \Lambda_n(\boldsymbol{\xi})) d_\xi S,$$

$\boldsymbol{n}_{n+1}$ – вектор внешней нормали к ∂D_{n+1}, $\Lambda(\boldsymbol{x}) = \Lambda_n(\boldsymbol{x})$ при $\boldsymbol{x} \in D_n$.

Решение уравнений (14)-(17), таким образом, сводится к определению теплового потока на поверхности S_1 и значений функции $\Lambda(\boldsymbol{x})$ на поверхностях S_2 и S_{2+n}, n = 1, 2, … , N-1, которые найдем из системы интегральных уравнений, получаемых подстановкой (18), (19) в гранично-контактные условия (15)-(17).

Выражение для функция $T(\boldsymbol{x})$, удовлетворяющей системе уравнений (9)-(12) будет иметь вид:

$$T(\boldsymbol{x}) = \Lambda_n^{-1}(\Lambda(\boldsymbol{x})), \quad \boldsymbol{x} \in D_n. \tag{20}$$

В граничных условиях (2), (10) S_1 - поверхность, принадлежащая границе нейтрального слоя (т.е. слоя постоянных годовых температур), расположенная в непосредственной близости (на глубине 20-40 м) относительно дневной поверхности Земли. При моделировании объектов с линейными размерами порядка десятков и первых сотен км обычно полагается, что дневная поверхности Земли плоская, поэтому можно считать, что поверхность S_1 так же является плоской. Моделирование крупных геологических регионов выполняется в приближении дневной поверхности Земли сферой радиуса R_3 (где R_3 - средний радиус Земли). В этом случае можно считать, что поверхность S_1 принадлежит сфере радиуса $R_0 = R_3 - h$, где h – глубина залегания нейтрального слоя.

Тогда в соотношениях (18)-(19) вместо функции $G(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi}) = 1/(4\pi)\cdot|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi}|^{-1}$ удобно использовать явные аналитические выражения функции Грина задачи Дирихле $G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})$, удовлетворяющую уравнению $\Delta G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi}) = -\delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})$ и принимающую на поверхности S_1 нулевое значение.

В случае, когда S_1 является частью плоскости, функция Грина будет иметь вид

$$G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi}) = 1/(4\pi)\cdot|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi}|^{-1} - 1/(4\pi)\cdot|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi}'|^{-1},$$

где $\boldsymbol{\xi}'$ - точка, получаемая зеркальным отображением точки $\boldsymbol{\xi}$ относительно плоскости, несущей S_1.

В случае, когда S_1 является частью сферы, функция Грина будет иметь вид

$$G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi}) = 1/(4\pi)\cdot|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi}|^{-1} - 1/(4\pi)\cdot R_0/\rho\cdot|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi}'|^{-1}.$$

где $\boldsymbol{\xi}'$ - точка, получаемая инверсией точки $\boldsymbol{\xi}$ относительно сферы, несущей S_1.

Тогда выражения для функций в правой части (19) будут иметь вид:

$$\Lambda^{(1)}(\boldsymbol{x}) = \sum_{n=1}^{N}\int_{D_n} f_n(\boldsymbol{\xi})\cdot G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})\,d_{\boldsymbol{\xi}}V, \quad \Lambda^{(2)}(\boldsymbol{x}) = \int_{S_2} q(\boldsymbol{\xi})\cdot G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})\,d_{\boldsymbol{\xi}}S, \tag{21}$$

$$\Lambda^{(3)}(\boldsymbol{x}) = -\int_{S_1}\partial G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})/\partial\boldsymbol{n}\cdot\Lambda(\boldsymbol{\xi})\,d_{\boldsymbol{\xi}}S - \int_{S_2}\partial G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})/\partial\boldsymbol{n}\cdot\Lambda(\boldsymbol{\xi})\,d_{\boldsymbol{\xi}}S - \sum_{n=1}^{N-1}\int_{S_{2+n}}\partial G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})/\partial\boldsymbol{n}\cdot(\Lambda_{n+1}(\boldsymbol{\xi})-\Lambda_n(\boldsymbol{\xi}))\,d_{\boldsymbol{\xi}}S. \tag{22}$$

Решение уравнений (14)-(17), таким образом, сводится к определению значений функции $\Lambda(\boldsymbol{x})$ на поверхностях S_2 и S_{2+n}, n = 1, 2, … , N-1.

Из выражения (19) получим интегральное уравнение для определения функции $\Lambda(\boldsymbol{x})$ в точках $\boldsymbol{x} \in S_2$:

$$\Lambda(\boldsymbol{x}) + 2\int_{S_2}\partial G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})/\partial\boldsymbol{n}\cdot\Lambda(\boldsymbol{\xi})\,d_{\boldsymbol{\xi}}S = F^{(1)}(\boldsymbol{x}), \quad \boldsymbol{x} \in S_2, \tag{23}$$

где $F^{(1)}(\boldsymbol{x}) = 2\Lambda^{(1)}(\boldsymbol{x}) + 2\Lambda^{(2)}(\boldsymbol{x}) - 2\int_{S_1}\partial G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})/\partial\boldsymbol{n}\cdot\Lambda(\boldsymbol{\xi})\,d_{\boldsymbol{\xi}}S - 2\sum_{n=1}^{N-1}\int_{S_{2+n}}\partial G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})/\partial\boldsymbol{n}\cdot(\Lambda_{n+1}(\boldsymbol{\xi})-\Lambda_n(\boldsymbol{\xi}))\,d_{\boldsymbol{\xi}}S$.

Пусть точка $\boldsymbol{x} \in S_{2+n}$. Поскольку по определению $S_{2+n} = \partial D_n \cap \partial D_{n+1}$ на основании (19) можно записать соотношения:

$$\Lambda_n(\boldsymbol{x}) = \Lambda^{(1)}(\boldsymbol{x}) + \Lambda^{(2)}(\boldsymbol{x}) + \Lambda^{(3)}(\boldsymbol{x}), \qquad \boldsymbol{x} \in D_n, \tag{24}$$

$$\Lambda_{n+1}(\boldsymbol{x}) = \Lambda^{(1)}(\boldsymbol{x}) + \Lambda^{(2)}(\boldsymbol{x}) + \Lambda^{(3)}(\boldsymbol{x}), \qquad \boldsymbol{x} \in D_{n+1}. \tag{25}$$

Тогда, просуммировав (24), (25), с учетом контактных условий (17) и выражений для $\Lambda^{(1)}(\boldsymbol{x}), \Lambda^{(2)}(\boldsymbol{x}), \Lambda^{(3)}(\boldsymbol{x})$ (22), (23), получим:

$$\Lambda_{n+1}(\boldsymbol{x})+\Lambda_n(\boldsymbol{x})+2\int_{S_{2+n}}\partial G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})/\partial\boldsymbol{n}\cdot[\Lambda_{n+1}(\boldsymbol{\xi})-\Lambda_n(\boldsymbol{\xi})]d_{\xi}S=F^{(2)}(\boldsymbol{x}),\quad \boldsymbol{x}\in S_{2+n}, \tag{26}$$

где $F^{(1)}(\boldsymbol{x})=4\Lambda^{(1)}(\boldsymbol{x})+4\Lambda^{(2)}(\boldsymbol{x})-4\int_{S_1}\partial G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})/\partial\boldsymbol{n}\cdot\Lambda(\boldsymbol{\xi})d_{\xi}S-2\sum_{i\neq n,\,i=1}^{N-1}\int_{S_{2+i}}\partial G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})/\partial\boldsymbol{n}\cdot(\Lambda_{i+1}(\boldsymbol{\xi})-\Lambda_i(\boldsymbol{\xi}))d_{\xi}S$.

Левая часть уравнения (26) содержит функции: $\Lambda_{n+1}(\boldsymbol{x})$ и $\Lambda_n(\boldsymbol{x})$.

Введем обозначение:

$L_n(\boldsymbol{x})=\Lambda_{n+1}(\boldsymbol{x})+\Lambda_n(\boldsymbol{x})$, $\boldsymbol{x}\in S_{2+n}$, n = 1, 2, … , N-1. (27)

По определению

$L_n(\boldsymbol{x})=L_n(T(\boldsymbol{x}))=\Lambda_{n+1}(T(\boldsymbol{x}))+\Lambda_n(T(\boldsymbol{x}))$.

Тогда, на основании (13)

$\Lambda_n(T)=\int_{T_0}^{T}\lambda_n(\tau)d\tau$, следовательно $L_n(T)=\int_{T_0}^{T}[\lambda_{n+1}(\tau)+\lambda_n(\tau)]d\tau$.

Поскольку $\lambda_{n+1}(\tau)>0$, $\lambda_n(\tau)>0$, существуют функция $L_n^{-1}(s)$, обратная $L_n(T)$ (s - некоторый элемент из множества значений $L_n(T)$). Таким образом, функции $L_n(\boldsymbol{x})$, $\Lambda_{n+1}(\boldsymbol{x})$, $\Lambda_n(\boldsymbol{x})$, $T(\boldsymbol{x})$ связаны между собой: если известно значение одной из этих функций, то известны значения остальных. Поэтому будем считать, что в уравнении (26) неизвестной является функция $L_n(\boldsymbol{x})$, и перепишем его в следующем виде:

$$L_n(\boldsymbol{x})+2\int_{S_{2+n}}\partial G^{(1)}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\xi})/\partial\boldsymbol{n}\cdot Q(\boldsymbol{\xi},L_n(\boldsymbol{\xi}))d_{\xi}S=F^{(2)}(\boldsymbol{x}),\ \boldsymbol{x}\in S_{2+n}, \tag{28}$$

где $Q(\boldsymbol{\xi},L_n(\boldsymbol{\xi}))=\Lambda_{n+1}(\boldsymbol{\xi})-\Lambda_n(\boldsymbol{\xi})=\Lambda_{n+1}(T(\boldsymbol{\xi},L_n(\boldsymbol{\xi})))-\Lambda_n(T(\boldsymbol{\xi},L_n(\boldsymbol{\xi})))$.

Таким образом, для определения значений функций $\Lambda_n(\boldsymbol{x})$ в точках $\boldsymbol{x}\in S_{2+n}$, n = 0, 1, … , N-1 получена система интегральных уравнений (23), (28). Уравнение (28) является нелинейным интегральным уравнением типа Урысона, уравнение (23) является линейным уравнением с вполне непрерывным оператором. Для решения системы (23), (28) будем использовать метод Ньютона-Канторовича.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гюнтер Н.М. Теория потенциала и ее применение к основным задачам математической физики/ -М.: Изд-во технико-теоретической литературы. – 1953. – 415 с.
2. Миранда К. Уравнения с частными производными эллиптического типа/ -М.: Изд-во иностранной литературы. 1957. - 256 с.
3. Михлин С.Г. Курс математической физики. СПб.:Издательство «Лань», 2002. 576 с.
4. Старостенко В.И., Кутас Р.И., Шуман В.Н., Легостаева О.В. Задача геотермии Рэлея-Тихонова и ее обобщение// Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей [Текст]: материалы 35-й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского. – Сыктывкар, 2007. – С. 289–290.
5. Пятаков Ю.В. Решение прямой задачи геотермии для трехмерной неоднородной среды // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 112–117.
6. Старостенко В.И., Пятаков Ю.В., Исаев В.И. Решение прямых задач гравиметрии для сферических аппроксимирующих тел. Тестирование алгоритмов. // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 35-39.

УДК 550.36

ВЗАИМОСВЯЗИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И ВОД

А.М. Романов, *ramix06@mail.ru*

РГП «Институт геофизических исследований», г. Курчатов, Республика Казахстан

Аннотация

Выполнено статистическое исследование взаимосвязей термодинамических параметров ионных соединений. Высокая, практически функциональная связь проявлена для пары энтальпия-энергия Гиббса. Связь этих характеристик с энтропией и удельной теплоемкостью также значима, но заметно слабее. Причина ослабления связи – вмешательство дополнительного фактора. Он представлен электрическим полем ионов. Энергия электрического поля характеризуется высоким уровнем корреляции с энтропией и удельной теплоемкостью, а через их посредство – с энтальпией и энергией Гиббса. Электрические и термодинамические параметры определяют различные стороны одного и того же процесса – взаимодействия горных пород и вод. Доказательством различия является резкое ослабление связи термодинамических параметров с производной от энергии электрического поля – напряженностью. Энтропия определяет зависимость энергии от структуры пространства через посредство изменения числа степеней свободы направления движения ионов и молекул. Удельная теплоемкость отражает вещественный фактор – химический и минеральный состав изучаемой среды который определяет удельное электрическое сопротивление среды. Для полноты определения особенностей взаимодействия горных пород и вод наряду с термодинамическими данными необходимо использовать целенаправленный комплекс электрометрических данных, в частности – электроразведку методами кажущегося сопротивления и естественного электрического поля.

Abstract

A statistical study made for relationship of the thermodynamic parameters of ionic compounds. High, almost functional relationship is manifested for a couple of enthalpy, Gibbs energy. The relationship of these characteristics with the entropy and specific heat as significant, but much weaker. The reason for the weakening of communication - an additional factor intervention. It contains the ions by an electric field. The energy of the electric field is characterized by a high level of correlation with the entropy and specific heat capacity, and through them - the enthalpy and Gibbs energy. The electrical and thermodynamic parameters define various aspects of the same process - the interaction of rock and water. Proof of differences is a sharp weakening of the relation between the thermodynamic parameters derived from the energy of the electric field - intensity. Entropy defines dependence of energy on the structure of space, through changes in the number of degrees of freedom of the direction of motion of ions and molecules. Specific heat capacity represent material factor - the chemical and mineral composition of the medium under study which defines the specific electrical resistance of the medium. To complete the definition of the interaction of rock and water, along with thermodynamic data necessary to use a focused set of electrometer data, in particular - of electrical methods of resistivity and the natural electric field.

По различным оценкам вероятность обнаружения глубокозалегающих метасоматических месторождений с малыми содержаниями рудных минералов на основе геолого-геофизического прогноза составляет от 0,005 до 0,00001. Низкая эффективность обусловлена сложной, зачастую линейно вытянутой формой рудных тел. Обнаружение таких объектов скважинами характеризуется высоким уровнем промаха. Кроме того, при малых содержаниях рудных компонентов геофизические сигналы на поверхности земли сопоставимы с уровнем помех.

Традиционно поисковые работы включают картирование рудовмещающих структур, имеющих большие размеры и выдержанность по сравнению с рудными телами. Наряду с

геологическими методами картирование использует методы общей геофизики, преимущественно грави- и магниторазведку. Но недостаточно эффективно. Причины: различия средних значений плотности и магнитной восприимчивости рудосодержащих и неизмененных горных пород вышеуказанных месторождений сопоставимы с погрешностью замеров. В частности, урановые месторождения не проявляются в гравитационном и магнитном полях. Электроразведка используется значительно реже и, в основном, для оконтуривания массивов различной литологии. Следовательно, стандартный подход к обоснованию постановки геофизических методов для картирования рудовмещающих структур – непригоден. Исследования в этом направлении ведутся с 70-х годов, но актуальны до настоящего времени. Целью представляемой работы является обоснование применения геофизических методов при картировании рудовмещающих структур метасоматических месторождений с малыми содержаниями полезных компонентов. Исходя из опыта 40 лет поисков месторождений урана и радиоэкологического мониторинга автором разработан новый подход, использующий геолого-геофизическое картирование на основе геоэлектрических особенностей взаимодействия горных пород и вод. Именно взаимодействие горных пород и вод является одной из наиболее значимых причин перераспределения веществ в литосфере. В т.ч. метасоматоза и рудообразования. Поэтому рудовмещающие структуры следует выявлять с помощью поисковых признаков, основанных на особенностях данного взаимодействия.

Наиболее простым представлением взаимодействия является растворимость веществ. Но, согласно Коржинскому, она не может быть определяющей характеристикой перехода веществ между фазами горных пород. Переход частичен и относится к процессам выщелачивания, а не растворения. Соответственно использование произведений растворимости также недостаточно корректно.

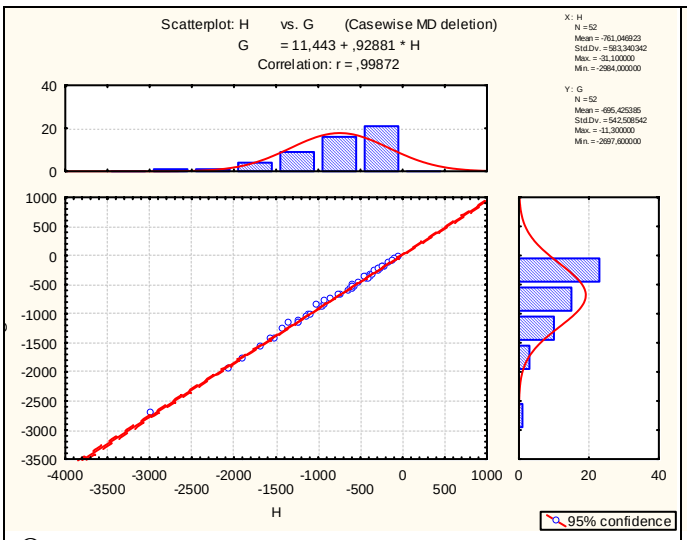
В реальных геологических средах потоки вод удаляют часть реагентов из места реакции и привносят новые вещества. Т.е., среды являются открытыми системами. Это нарушает основное условие применимости химической термодинамики. Кроме того, термодинамические представления не учитывают геометрию пространства, в котором происходят химические реакции. Вследствие этого накопление веществ в т.н. «структурных ловушках» не имеет должного объяснения.

Вышеприведенные представления относятся к химическим и не могут использоваться в качестве физико-геологических предпосылок. Т.е. обоснование применимости геофизических методов для картирования рудовмещающих структур в данном контексте отсутствует. Необходима разработка физического обоснования взаимодействия горных пород и вод.

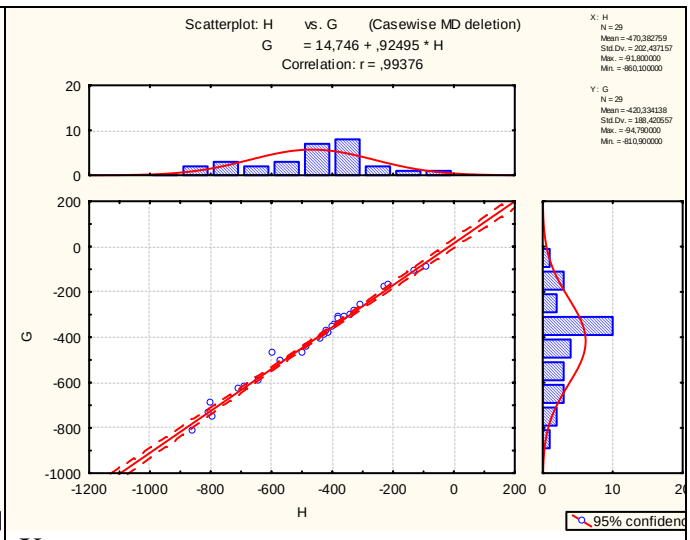
Взаимодействие горных пород и вод обычно изучается на основе представлений химической термодинамики, определяющей физико-химические превращения через посредство перераспределений тепла. При этом используются четыре основных параметра: энтальпия (H), свободная энергия Гиббса (G), удельная теплоемкость (C_P) и энтропия (S) [2].

В ходе статистической обработки значений термодинамических параметров установлена высокая и значимая корреляционная связь между энтальпией и свободной энергией Гиббса неорганических соединений, сгруппированным по различию анионов.

Так, на примере двух выборок (окислов и хлоридов) коэффициент корреляции положителен, значим и составляет от 0,999 и 0,994 соответственно. Т.е. связь относится к значимой, практически функциональной зависимости. Графики распределения парных значений H и G представлены на рисунке 1. Интервалы парных значений H и G находятся на одной прямой, но смещены друг относительно друга.



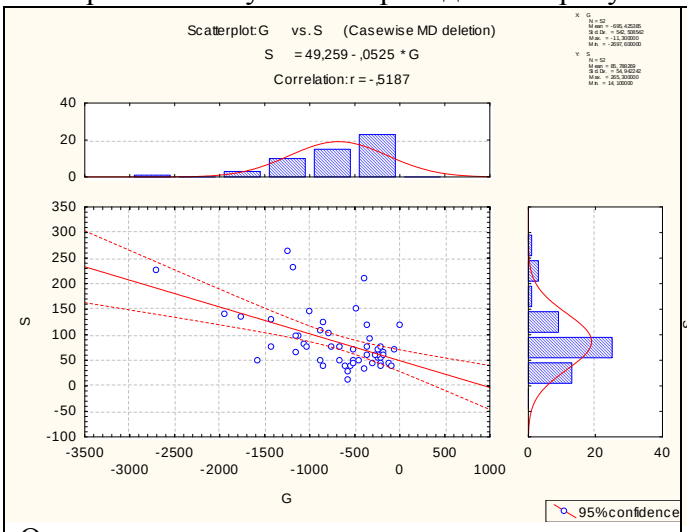
Окислы



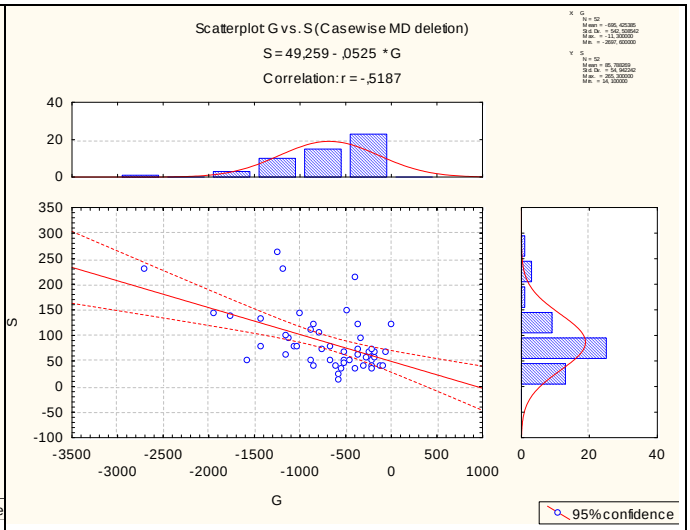
Хлориды

Рисунок 1. Графики парных значений энтальпии и энергии Гиббса окислов и хлоридов

Рассмотрена также значимость связей свободной энергии Гиббса, а также энтальпии с энтропией. Результаты приведены на рисунке 2.



Окислы

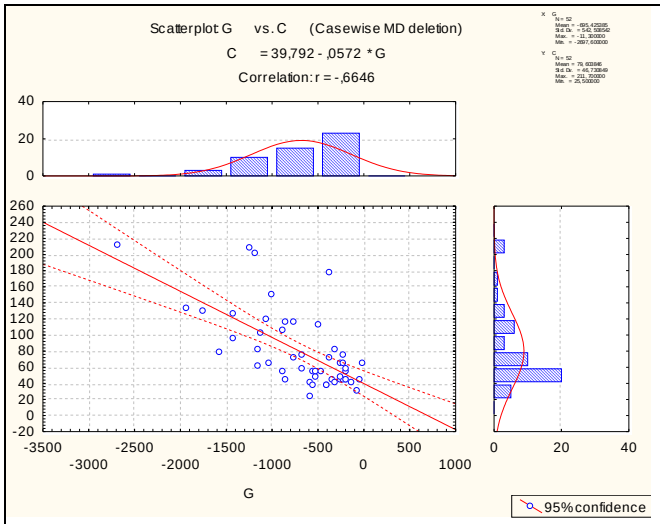


Хлориды

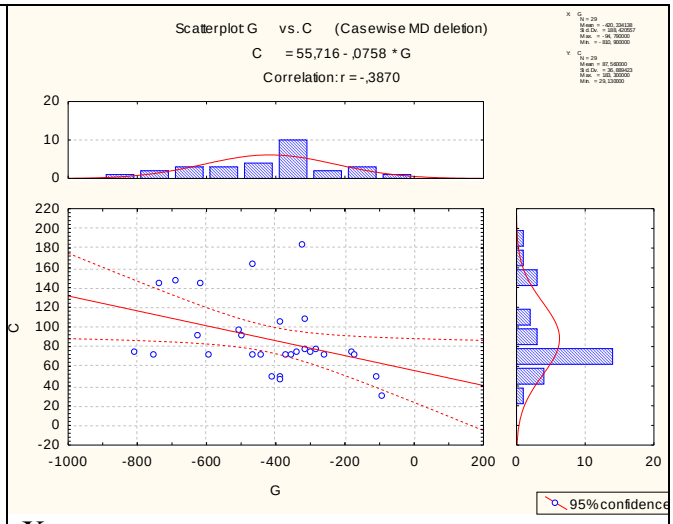
Рисунок 2. Зависимость свободной энергии Гиббса и энтропии *)

*) Практически функциональная связь энтальпии и свободной энергии Гиббса снимает необходимость представления зависимость энтальпии и энтропии

Заметно меньший по сравнению со связью H и G (но тем не менее значимый) уровень коэффициентов корреляции и вид графиков (значительный разброс от аппроксимирующей линии) указывает на вмешательство стороннего фактора в зависимости H и G от S и. Причем фактора, природа которого отличается от природы энергий H и G, т.е. от теплоты. Вмешательство этого фактора может нарушить линейность связей термодинамических параметров. Аналогично характеризуются зависимости удельной теплоемкости (C) от H и G (рисунок 3).



Окислы

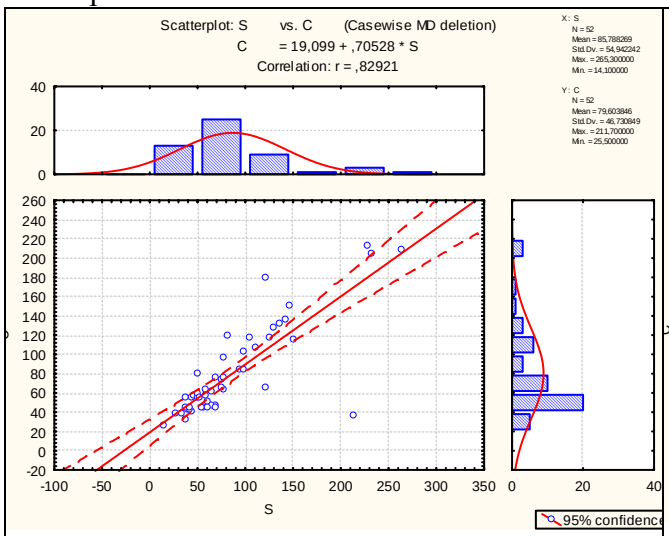


Хлориды

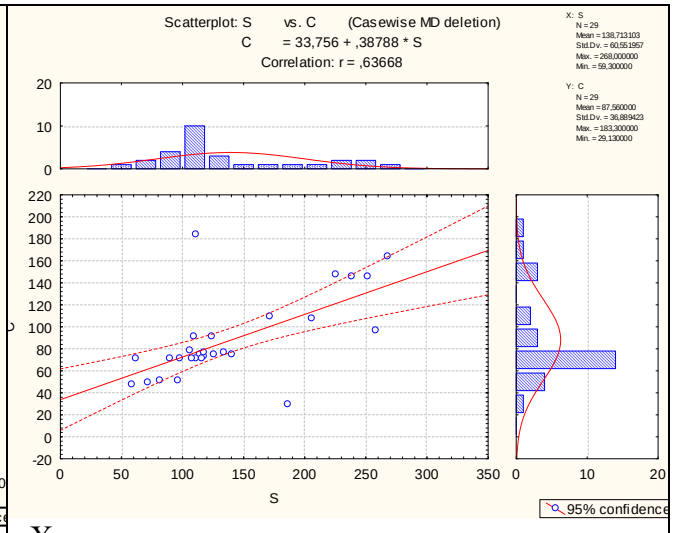
Рисунок 3. Зависимость свободной энергии Гиббса и удельной теплоемкости

Графики парных зависимостей энтропии и удельной теплоемкости приведены на рисунке 4.

Гистограммы энтропии и удельной теплоемкости характеризуются наличием двух вершин. Оно проявлено систематически и для окислов и для хлоридов. Наличие двух вершин свидетельствует о том, что каждая из выборок термодинамических параметров фактически представляет собой совокупность двух выборок различной природы. Природа одной выборки – теплота.



Окислы



Хлориды.

Рисунок 4. Парная связь между энтропией и удельной теплоемкостью

Теплота является мерой энергии, переходящей от одного тела к другому в процессе теплопередачи. Внутренняя энергия изменяется через посредство теплообмена в результате совершения работы. Эта работа складывается из работ сил, действующих на молекулы системы на границе контакта более нагретого тела с менее нагретым. Энергия передаётся посредством столкновений молекул, а также излучением от одного тела к другому.

Природа второй выборки определяется исходя из того, что эта выборка преимущественно проявлена по веществам с высокой валентностью катионов. Т.е. там, где повышена энергия электрического поля катионов. Кроме того, учитывается известное явление: при нагреве кристаллических объектов повышение тепловой энергии сопровождается повышением температуры. При достижении точки плавления дальнейшее повышение температуры не происходит до тех пор, пока объект не расплавится (переход объекта из твердой фазы в жидкую) несмотря на подвод тепла. Т.е. *часть энергии затрачивается на изменение упорядочивания движения молекул – разрушение структуры среды – кристаллического объекта.* Структурирование выражается в пространственной

ориентировке молекул. Если молекулы представляют собой электрические диполи (сочетание катионов и анионов), то следствием ориентировки является электрическое поле. Чем больше удельное количество электрических диполей, ориентированных в едином направлении, - тем больше уровень результирующего электрического поля.

Электрические поля диполей обеспечивают:

1. внутреннее силовое взаимодействие катионов и анионов веществ. Оно определяется разностью энергий ионов с учетом их знаков и радиусов (U_{in});
2. внешнее силовое воздействие катионов и анионов веществ на окружающую среду. Оно определяется суммой энергий ионов с учетом их знаков и радиусов (U_{ex}).

Энергия электрического поля U_i отдельно взятого иона определяется по формуле [1]:

$$Ui = \frac{3 * n_i * e^2}{5 * r_i} \qquad (1)$$

где n_i – валентность иона (с учетом знака), e - заряд электрона, r_i - радиус иона.

Эмпирические и расчетные значения параметров сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Сопоставление термодинамических и электрических параметров некоторых ионных соединений

ОКИСЛЫ

	U_{in}	U_{ex}	H	S	C	G
K+	6,82	-2,22	-363,2	94,1	83,7	-322,1
Ag+	7,24	-1,8	-31,1	121	65,86	-11,3
Na+	7,66	-1,38	-416	75,27	72,95	-377,1
••••	•••	•••	•••	•••	•••	•••
Nb+++++	138,94	49,14	-1898	137,2	132,09	-1764,1
Sb+++++	146,46	52,9	-1007,5	125,1	117,6	-864,7
••••	•••	•••	•••	•••	•••	•••

ХЛОРИДЫ

	U_{in}	U_{ex}	H	S	C	G
K+	2,03	0,27	-435,9	82,56	51,29	-408
Ag+	2,24	0,48	-127,1	96,11	50,79	-109,8
Na+	2,45	0,69	-411,1	72,12	49,71	-384
••••	•••	•••	•••	•••	•••	•••
Nb+++++	62,58	53,78	-797,5	226	147,9	-687,7
Si++++	66,54	59,5	-687,8	239,7	145,3	-617,6
••••	•••	•••	•••	•••	•••	•••

Аналогичные таблицы составлены и для других ионных соединений.

Выполнено статистическое исследование по выявлению взаимосвязей термодинамических и электрических параметров среды. Составлены корреляционные матрицы (таблица 2), кластерные диаграммы параметров (рисунок 5), приведены графики парных значений термодинамических и электрических параметров среды (рисунки 6-7).

Таблица 2. Матрицы коэффициентов корреляции термодинамических и электрических параметров ионных соединений

ОКИСЛЫ

	U_{in}	U_{ex}	H	S	C	G
U_{in}	1,00	0,93	-0,61	0,57	0,61	-0,60
U_{ex}	0,93	1,00	-0,49	0,51	0,51	-0,47
H	-0,61	-0,49	1,00	-0,54	-0,69	1,00
S	0,57	0,51	-0,54	1,00	0,83	-0,52
C	0,61	0,51	-0,69	0,83	1,00	-0,66
G	-0,60	-0,47	1,00	-0,52	-0,66	1,00

ХЛОРИДЫ

	U_{in}	U_{ex}	H	S	C	G
U_{in}	1,00	1,00	-0,40	0,74	0,73	-0,34
U_{ex}	1,00	1,00	-0,39	0,74	0,70	-0,32
H	-0,40	-0,39	1,00	-0,34	-0,46	0,99
S	0,74	0,74	-0,34	1,00	0,64	-0,28
C	0,73	0,70	-0,46	0,64	1,00	-0,39
G	-0,34	-0,32	0,99	-0,28	-0,39	1,00

Выделенные значения коэффициентов корреляции параметров с вероятностью 95% относятся к значимым.

В корреляционных матрицах представлены:

1. практически функциональная связь между внешней и внутренней энергией электрического поля. Коэффициенты корреляции составляют от 0,93 для окислов, до 1,00 для хлоридов. Причина высокого уровня связи: взаимодействие ионов вещества.
2. ранее отмеченная функциональная связь между энтальпией и свободной энергией Гиббса. Причина высокого уровня связи: переменные величины H и G отличаются на одну и ту же постоянную величину;

3. наличие значимой и высокой связи между энергией электрического поля и энтальпией, энтропией, удельной теплоемкостью, а также свободной энергией ионных соединений. Наиболее вероятные причины:
   - структурирование сред в процессе взаимодействия веществ [3]. В частности, оно может происходить в результате движения фронта реакции объемов реагентов;
   - электрические и термодинамические параметры характеризуют различные стороны одного и того же процесса – взаимодействия ионов реагирующих веществ [3].
4. высокое сходство распределений коэффициентов корреляции параметров окислов и хлоридов. Наиболее вероятная причина: одинаковость процессов перераспределения веществ с различными анионами.

Аналогичные матрицы получены и для других ионных соединений.

Иерархия взаимосвязей электрических и термодинамических параметров представлена на рисунке 5. Высокое сходство приведенных дендрограмм подчеркивает сходство взаимосвязей электрических и термодинамических параметров. При этом различие анионов не оказывает существенного влияния на характер взаимосвязей параметров.

Согласно кластерному и корреляционному анализам устанавливается, что параметры энтропия и удельная теплоемкость характеризуются более тесной связью с энергией электрического поля (внешней и внутренней) чем с энтальпией и свободной энергией Гиббса. Общая энергия (совместно тепловая и электрическая) проявляется через энтропию, а также удельную теплопроводность (которая вероятно связана с электропроводностью). Различие природы электрического и теплового поля при совместном проявлении обуславливает неизбежность ослабления корреляционных связей энтропии и удельной теплоемкости с термодинамическими и электрическими параметрами, что и отмечается на соответствующих графиках рисунков 2,3,4.

Исходя из кластерных диаграмм предполагается, что взаимосвязь электрических параметров с энтальпией и свободной энергией Гиббса, осуществляется через посредство энтропии и удельной теплоемкости.

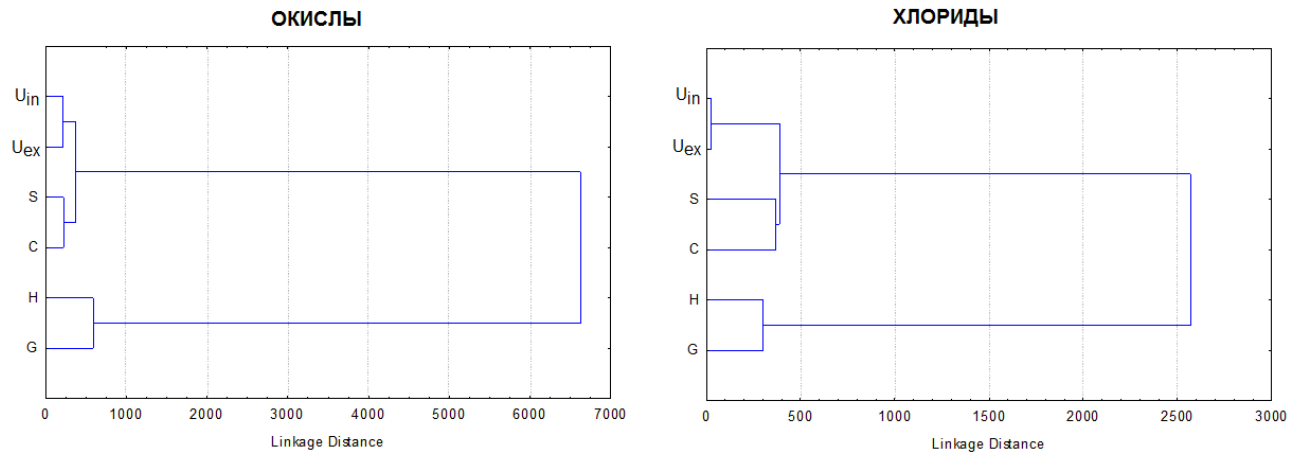


Рисунок 5. Кластерные диаграммы термодинамических и электрических параметров ионных соединений

Изложенное иллюстрируется графиками парных зависимостей параметров. Рисунок 6 представляет высокую, практически функциональную зависимость внутренней и внешней энергии электрического поля. Это позволяет ограничить представление рассмотрением связей внутренней энергии электрического поля с термодинамическими параметрами на примере хлоридов (рисунки 7-10).

Полученные результаты относятся к повторяющимся, закономерным. Отсюда: энергия взаимодействия ионопроводящих веществ наряду с теплотой включает также энергию электрического поля.

Доказательство существенности различий электрической и тепловой составляющей энергии взаимодействия ионопроводящих веществ выполнено на основе статистического сопоставления вышеприведенных данных с внутренней и внешней напряженностью электрического поля. Выполнено сопоставление значений коэффициентов корреляции напряженности с остальными параметрами (таблица 3).

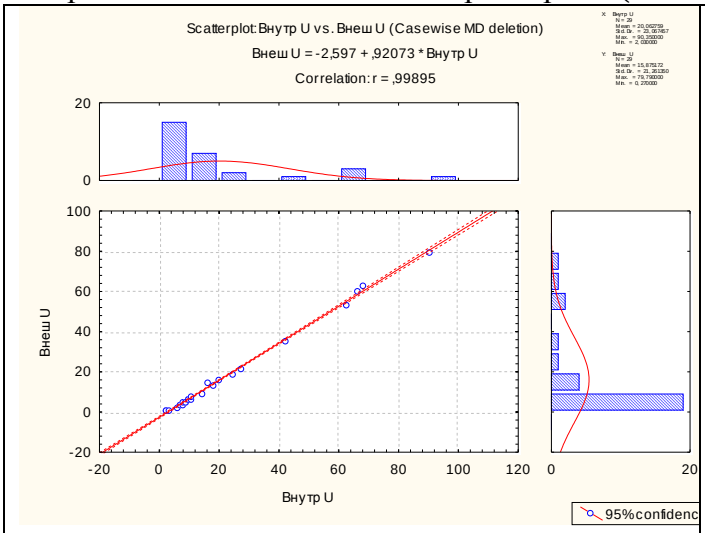


Рисунок 6. Связь внешней и внутренней энергии электрического поля хлоридов

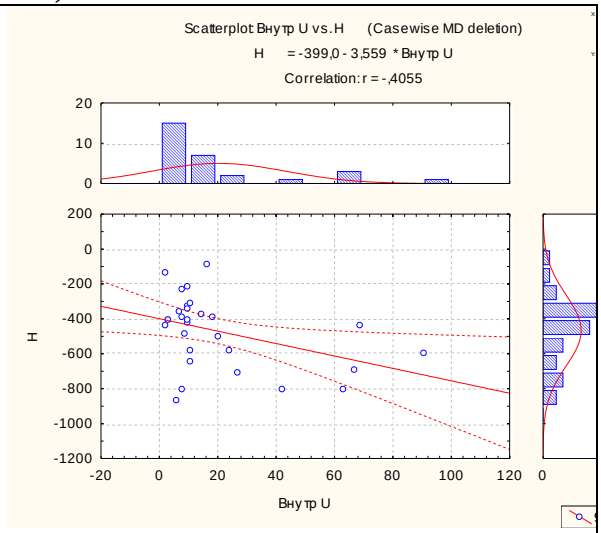


Рисунок 7. Связь внутренней энергии электрического поля и энтальпии хлоридов

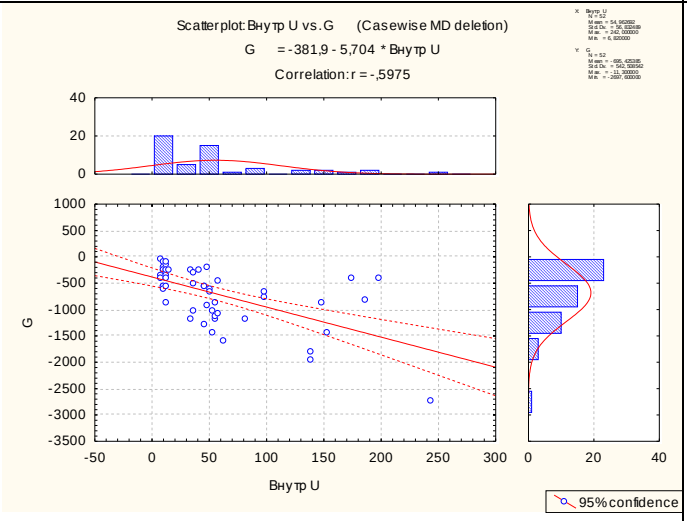


Рисунок 8. Связь внутренней энергии электрического поля и свободной энергии Гиббса

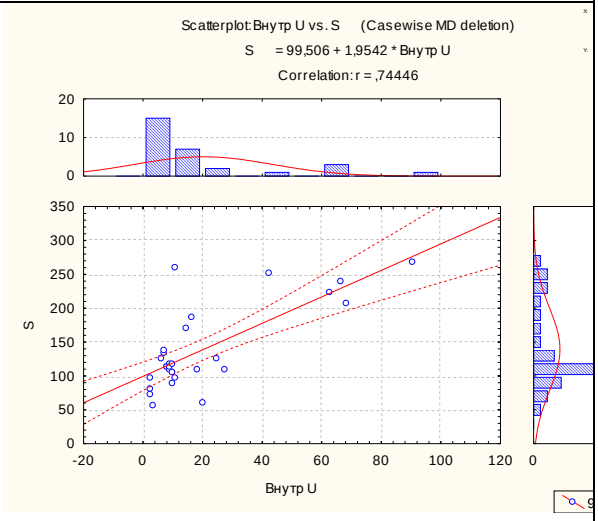


Рисунок 9. Связь внутренней энергии электрического поля и энтропии хлоридов

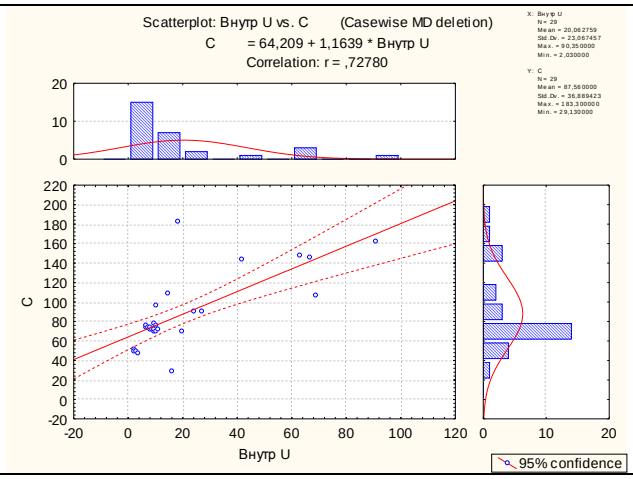


Рисунок 10. Связь внутренней энергии электрического поля и удельной теплоемкости

Таблица 3. Корреляционная матрица между электрическими и термодинамическими характеристиками окислов и хлоридов с учетом напряженности

	Окислы		Хлориды	
Параметры	Внутренняя напряженность E_{in}	Внешняя напряженность E_{ex}	Внутренняя напряженность E_{in}	Внешняя напряженность E_{ex}
U_{in}	**0,65**	**0,77**	**0,79**	**0,78**
U_{ex}	**0,77**	**0,86**	**0,81**	**0,80**
E_{in}		**0,96**		**1,00**
E_{ex}	**0,96**		**1,00**	
H	-0,08	-0,25	-0,09	-0,09
S	**0,42**	**0,50**	**0,58**	**0,58**
C	0,16	0,30	0,34	0,34
G	-0,08	-0,25	-0,07	-0,07

Выделены значения коэффициентов корреляции, превышающие критический уровень.

Распределения значений коэффициентов корреляции параметров и окислов и хлоридов близки. Аналогично с предыдущими таблицами наиболее высоким уровнем значений коэффициентов корреляции (практически функциональной связью) характеризуются E_{in} и E_{ex}. Высокими, но несколько меньшими значениями отмечаются коэффициенты корреляции энергии и напряженности электрического поля, что объясняется функциональным различием этих характеристик. Повышенными и практически одинаковыми значениями коэффициентов корреляции характеризуются связи напряженности электрического поля с энтропией. Графическое представление взаимосвязей показано кластерными диаграммами рисунка 11.

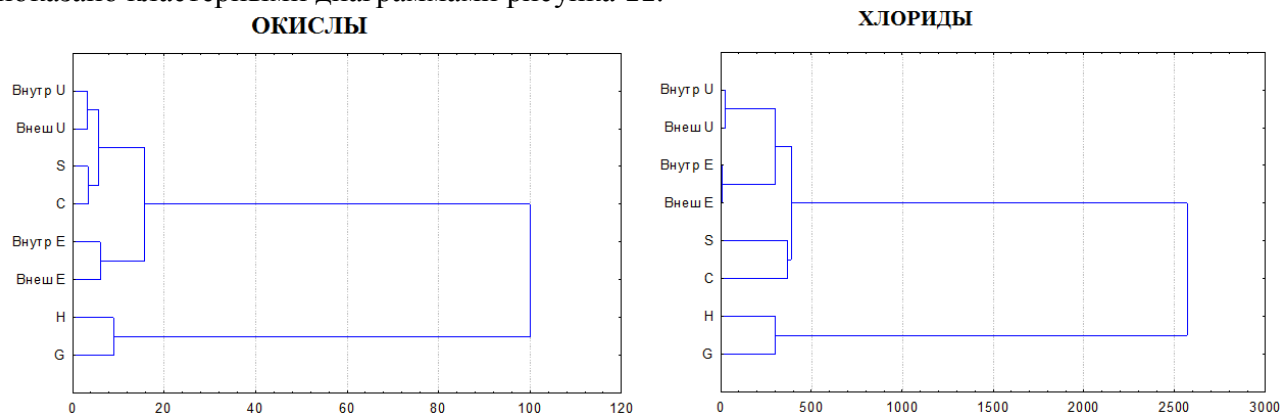


Рисунок 11. Кластерные диаграммы электрических и термодинамических параметров с учетом напряженности (E) электрического поля

Приведенные данные контрастно представляют различие электрических и химических составляющих процесса взаимодействия твердой и жидкой фаз. Таким образом, существенность различия электрической и тепловой составляющей энергии взаимодействия ионопроводящих веществ полагается доказанной.

Напряженность электрического поля - это силовая характеристика. Именно она определяет интенсивность и направленность взаимодействия ионов. Теплота влияет на интенсивность движения ионов и молекул вещества. Очевидно, что взаимодействие горных пород и вод в данном контексте обусловлено электрическим и тепловым воздействиями - сторонами одного и того же процесса (физико-химического преобразования исследуемой среды). Связующим звеном сторон является термодинамический параметр – энтропия. В свою очередь, энтропия тесно связана с удельной теплоемкостью.

Наиболее вероятные причины преимущественной связи электрических параметров с энтропией и удельной теплоемкостью:

1. предполагается, что значительная часть энтропии обусловлена протеканием электрического тока, образующегося за счет разности электрических потенциалов реакций. При этом энергия электрического поля расходуется на перераспределение ионов, а также на нагрев реагирующей среды. Кроме того, эффекты Зеебека и Пельтье свидетельствует о возможности взаимного перехода тепловой и электрической энергии;
2. удельная теплоемкость отражает вещественный фактор – химический и минеральный состав изучаемой среды. Минеральный состав определяет удельное электрическое сопротивление среды. Т.е. удельная теплоемкость тесно связана с удельным электрическим сопротивлением веществ. Кроме того известно, что нагрев веществ обусловлен прохождением электрического тока через среду, характеризующуюся удельным электрическим сопротивлением.

Энтропия определяет зависимость энергии от структуры пространства через посредство изменения числа степеней свободы направления движения ионов и молекул. Данный фактор не изучается на основе химических данных, т.к. непосредственно химические процессы не зависят от формы объема, в котором происходят реакции. Зато через посредство энергии Гиббса энтропия зависит от давления. Именно давление обеспечивает формирование электрических потенциалов течения – естественного электрического поля в литосфере. Т.е. соответствующий комплекс исследований процесса взаимодействия горных пород и вод наряду с термодинамическими должен также включать физические методы, а именно – электрометрические.

Таким образом, для полноты определения особенностей взаимодействия горных пород и вод наряду с термодинамическими данными необходимо использовать целенаправленный комплекс электрометрических данных. В частности, при геологическом картировании требуется применение специализированных геофизических методов – замеров кажущегося электрического сопротивления и естественного электрического поля. Следует заметить, что согласно практике геологического картирования электрические параметры изучаемой среды определяются с меньшими затратами и большей информативностью по сравнению с термодинамическими параметрами, используемыми геохимическими методами. Кроме того, в отличие от геохимического опробования, требующего непосредственного контакта с исследуемой средой, геофизические методы могут определять особенности взаимодействия горных пород и вод дистанционно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.К. Теория поля//М., Недра, 1979, 352 с.
2. Равдель А.А., Пономарева А.М. Краткий справочник физико-химических величин // Л.: Химия, 1983, - 230 с.
3. Романов А.М. Взаимодействие вод с горными породами. Алматы, ИВТ НАК «Казатомпром». 2003. 247 с.

УДК 550.3:550.4

ВАРИАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА В ПЕРИОДЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

С.А. Рябова, А.А. Спивак, *ryabovasa@mail.ru, spivak@idg.chph.ras.ru*
ФГБУН Институт динамики геосфер РАН, 119334, г. Москва, Россия

Анализируются результаты синхронной регистрации геомагнитного поля и сейсмического фона на поверхности земной коры, выполненные на Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН. Показано, что вариации магнитного поля импульсного типа (внезапные начала магнитных бурь (SSC события) и внезапные геомагнитные импульсы (SI события)), вызывают повышенные амплитудные вариации фоновых сейсмических колебаний в частотном диапазоне 0,001 – 0,1 Гц. Впервые установлена количественная зависимость между амплитудой внезапного геомагнитного импульса и максимальной амплитудой вариации среднеквадратической скорости колебаний в сейсмическом фоне.

SEISMIC BACKGROUND VARIATIONS DUE TO GEOMAGNETIC VARIATIONS

S.A. Ryabova, A.A. Spivak, *ryabovasa@mail.ru, spivak@idg.chph.ras.ru*
Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The results of synchronous registration of geomagnetic field and seismic background at the Earth's crust surface are considered. It was determined that variations of the magnetic field of impulse type (Storm Sudden Commencement (SSI event) and Sudden Impulse (SI event) result to heightened seismic background variations in the frequency band of 0,001 – 0,1 Hz. For the first time the quantitative relation between amplitude of SSC and SI impulses and maximum variation of the root-mean-square amplitude of the seismic background was determined.

Взаимодействие и преобразование геофизических полей на приповерхностных участках земной коры представляет особый интерес при установлении природы и механизмов межгеосферных взаимодействий и определении влияния геофизических полей на среду обитания [1,2].

Вопрос о возможном влиянии магнитных бурь и в первую очередь магнитных бурь с внезапным началом (так называемые SSC-события) на сейсмичность неоднократно рассматривался в литературе [3 – 6]. В меньшей степени обсуждался вопрос о влиянии магнитных бурь на сейсмический фон [7,8].

В настоящей работе исследовалась возможная связь между геомагнитными возмущениями на земной поверхности и поля микросейсмических колебаний. В качестве исходных данных привлекались результаты синхронных наблюдений за геомагнитными вариациями на земной поверхности и уровнем сейсмического фона на Геофизической обсерватории "Михнево" ИДГ РАН.

Регистрация локальных геомагнитных вариаций выполнялась с помощью феррозондового магнитометра LEMI-018. Сейсмические измерения выполнялись с помощью сейсмоприемников СМ-3КВ и STRECKEISEN STS-2. Для сбора и накопления данных привлекались программируемые регистраторы QUANTERRA-380 и REFTEK-72A. Предварительно с помощью разработанной ранее методики [9] было установлено отсутствие наводки на сейсмоприемники при магнитных вариациях, амплитудой до 5 мкТл (амплитуда исследуемых геомагнитных вариаций не превышала 0,3 мкТл).

Результаты регистрации геофизических полей на ГФО "Михнево" размещены на сайте ИДГ РАН idg–copmp/chph/ras/ru/~mikhnevo/data/.

С целью приведения данных к эквидистантному виду и восстановления данных в пропусках и "выбросах" цифровых рядов использовались как простые методы (исключение строк с наличием пропусков, заполнение пропусков средними по столбцу значениями, метод ближайших соседних данных, resampling-метод [10], метод Бартлетта [10], метод

максимальной правдоподобности и EM-алгоритм, алгоритмы ZET и ZetBraid [11]), так и более сложные: восстановления с использованием ряда Котельникова [12,13], дискретно временного преобразования Фурье [14,15] и сплайн-интерполяции программного пакета MatLab. При этом рассматривались следующие случаи: 1) приведение исходного ряда, содержащего пропуски, к равномерной по времени сетке (обеспечивает возможность восстановления данных с помощью ряда Котельникова, преобразования Фурье и сплайн-интерполяции); 2) создание неравномерной временной сетки, что дает бóльшую точность восстановления данных, а также обеспечивает возможность восстановления данных с помощью ряда Котельникова и сплайн-интерполяции.

Обработка цифровых радов заключалась в определении амплитуды геомагнитных вариаций относительно фоновых значений, которые вычислялись как среднеквадратическое за период 1 – 2 часа, предшествующий геомагнитной вариации. При этом использовались значения амплитуды положительного импульса, которая определялась как разность

$$B = B_I - B_T ,$$

где B_I и B_T – соответственно максимальный в импульсе и средний за час перед импульсом модуль горизонтального вектора магнитной индукции. Величина B принимала значение от 20 до 300 нТл при скорости изменения магнитного поля в диапазоне 20 – 600 нТл/час. Основной интерес с точки зрения установления отклика сейсмического фона на геомагнитные возмущения вызывают вариации сейсмического фона в периоды резких изменений магнитного поля (геомагнитные вариации импульсного типа: SSC и SI события [16]).

Амплитудные вариации сейсмического фона характеризовались максимальной средней амплитудой скорости колебаний V за вычетом тренда.

В качестве примера на рис. 1 приведены примеры анализируемых геомагнитных вариаций (представлена основная B_x компонента в направлении на географический север).

Здесь следует отметить, что в настоящей работе наряду с событиями, для которых станционный индекс геомагнитной активности К ≥ 4, и которые традиционно рассматриваются как локальные магнитные бури, анализировались также внезапные импульсы событий с К = 3 (возмущенное состояние локального геомагнитного поля), амплитуда которых превышала 15 нТл, так как диапазоны амплитуд внезапных импульсов для событий с разными значениями индекса K, как это следует из данных табл. 1, заметно пересекаются.

Обработка и анализ данных синхронных наблюдений за геомагнитными вариациями и амплитудой сейсмического фона показывают, что во время импульсных вариаций магнитного поля в большинстве случаев наблюдается повышение уровня сейсмического фона. При этом спектральный анализ свидетельствует о том, что отклик сейсмического фона на геомагнитные вариации наблюдается в основном в частотном диапазоне 0,01 – 0,1 Гц. Следует отметить, что вызванные вариации сейсмического фона имеют сложный характер и зависят от конкретного геомагнитного возмущения.

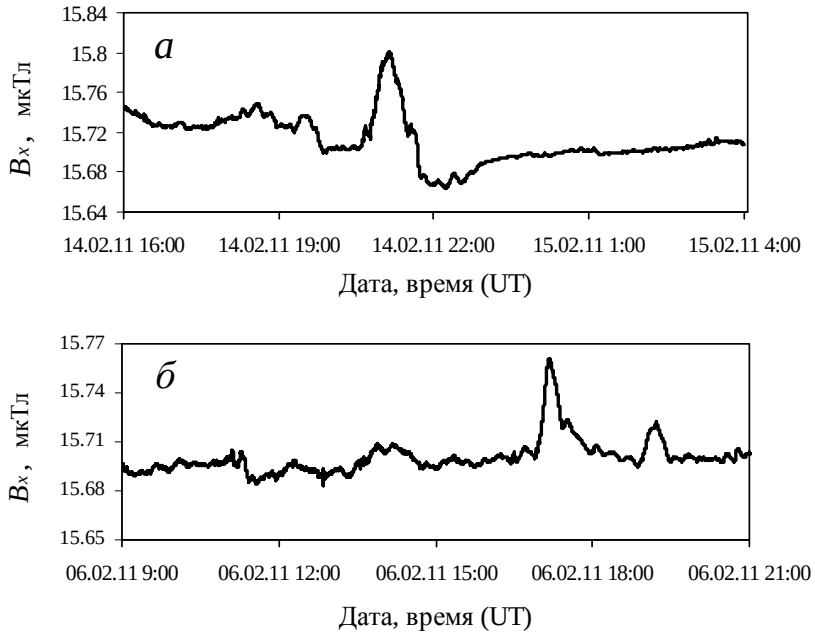


Рис.1. Примеры SSC (*а*) и SI (*б*) геомагнитных вариаций

Таблица 1. Относительная амплитуда внезапного геомагнитного импульса для событий с разным станционным индексом локальным *K*

K	Диапазон амплитуд геомагнитных вариаций, нТл						
	1 0 – 40	4 0 – 60	6 0 – 80	80 – 100	10 0 – 150	15 0 – 200	20 0 – 300
3							
4							
5							
6							
7							

Примеры синхронных вариаций магнитного и сейсмического фона приведен на рис.2.

Пример прямого сопоставления геомагнитных вариаций и амплитудных вариаций сейсмического фона для одного из событий приведен на рис.3.

С целью установления количественного соответствия между вариациями сейсмического фона и геомагнитными вариациями анализировалась выборка из 32-х наиболее ярко выраженных событий. Амплитудные вариации сейсмического фона характеризовались максимальной амплитудой скорости колебаний V_m за вычетом тренда. Результаты анализа представлены на рис.4 в виде зависимости максимального значения усредненных вариаций скорости фоновых колебаний V_m от относительной амплитуды геомагнитного импульса *B*.

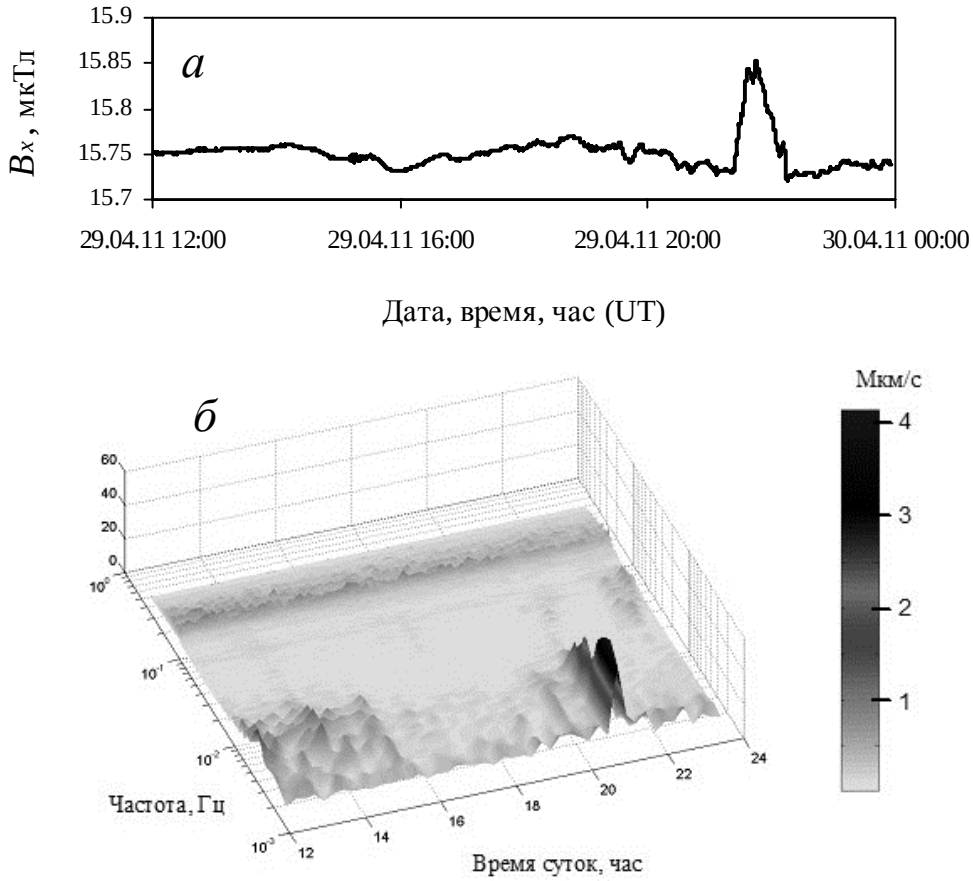


Рис. 2. Пример сопоставления вариаций горизонтальной компоненты магнитной индукции (верхняя панель) и наведенных вариаций сейсмического фона (нижняя панель)

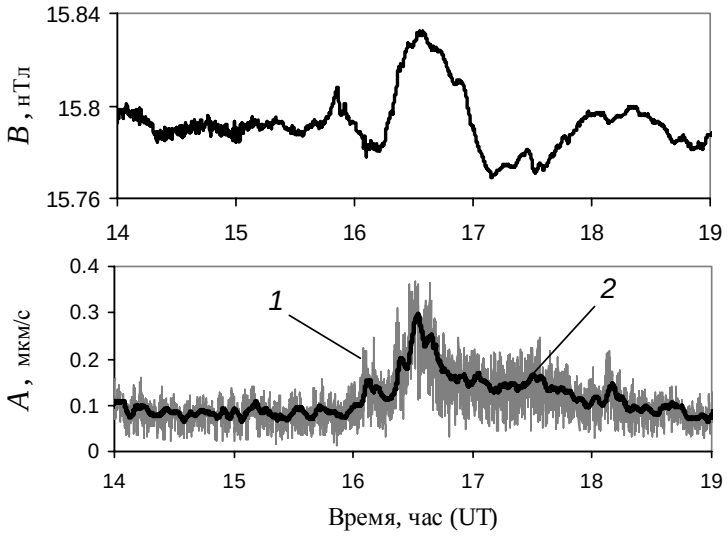


Рис. 3. Пример синхронных вариаций относительной амплитуды внезапного геомагнитного импульса в период магнитной бури $K = 5$ (верхняя панель) и скорости колебаний в микросейсмическом фоне A (нижняя панель) 30.10.2008 г.
1 – вариация амплитуды горизонтального вектора скорости колебаний,
2 – скользящее среднее значение скорости колебаний (усреднение в окне 200 с)

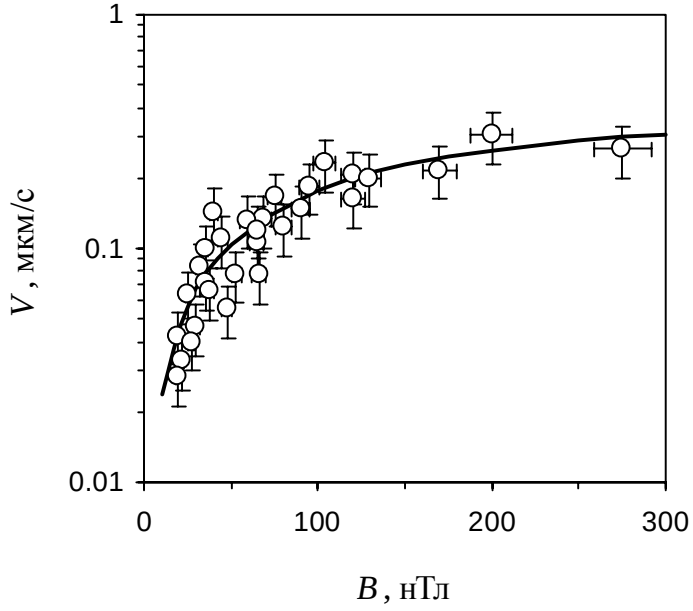


Рис. 4. Зависимость между среднеквадратичной амплитудой вариаций сейсмического фона, наведенных в период геомагнитных вариаций с амплитудой горизонтальной составляющей *B*.

Из данных рис.4 хорошо видно, что более сильным геомагнитным вариациям соответствуют более интенсивные вариации скорости колебаний сейсмического фона. При этом существенно, что в диапазоне 20 – 100 нТл величина отклика микросейсмического поля растет практически линейно с величиной *B*, а затем по мере увеличения амплитуды геомагнитных вариаций зависимость *V*(*B*) «выполаживается», что может свидетельствовать о снижении уровня отклика сейсмического фона на геомагнитные возмущения по мере возрастания их интенсивности.

Аналитически полученная зависимость *V*(*B*) с достаточной для практических оценок точностью аппроксимируется зависимостью:

$$V = 0{,}35\left\{1 - e^{-0{,}007B}\right\} \text{ мкм/с,}$$

где *B* выражено в нТл.

Статистический анализ данных указывает на значимую корреляцию между анализируемыми параметрами *V* и *B* (коэффициент ранговой корреляции Спирмена составляет 0,91 при статистической значимости $\rho \le 0{,}01$).

Приведенные выше данные демонстрируют наличие связи между амплитудой геомагнитных вариаций и вероятным откликом сейсмического фона в конкретных условиях ГФО "Михнево" ИДГ РАН. Установленная в настоящей работе корреляция между геомагнитными вариациями импульсного типа и вариациями амплитуды поля микросейсмических колебаний позволяет в данном случае лишь предполагать их причинно-следственную зависимость, в частности, возможность влияния геомагнитных возмущений на изменение амплитудных характеристик микросейсмического поля.

Для обоснования прямого преобразования энергии между рассматриваемыми геофизическими полями необходимо выполнить целенаправленные исследования, связанные, в частности, с установлением механизмов влияния геомагнитных возмущений на поле фоновых сейсмических колебаний и разработкой соответствующих аналитических и расчетных моделей взаимодействия полей.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 14-05-00073-а).

Литература

1. *Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Соловьев С.П.* Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе земная кора-атмосфера// Физика Земли. 2006. №7. С.34 - 51.
2. *Экология* человека в изменяющемся мире/ Колл. авторов. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 570 с.
3. *Сытинский А.Д.* О связи землетрясений с солнечной активностью / Физика Земли. 1989. № 2. С. 13 – 30.
4. *Барсуков О.М.* Солнечные вспышки, внезапные начала и землетрясения // Физика Земли. 1991. № 12. С. 93 – 97.
5. *Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Харин Е.П.* О связи сейсмичности с магнитными бурями //Физика Земли. 2001. № 11. С.62 – 72.
6. *Закржевская Н.А., Соболев Г.Н.* О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. 2002. № 4. С.3 – 15.
7. *Попова О.Г. Жигалин А.Д., Коновалов Ю.Ф.* Связь изменения напряженного состояния земной коры с солнечными затмениями и магнитными бурями // Геоэкология. 2011. № 3. С. 55 – 71.
8. *Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н.* О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума // Физика Земли. 2011. № 3. С.55 – 71.
9. *Горюнов Б.Г., Кабыченко Н.В., Павлов Д.В., Свинцов И.С.* Реакция электродинамических сейсмопремников на внешние магнитные поля// Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли. М.: ИДГ РАН, 2003. С.361 – 364.
10. *Злоба Е., Яцкиев И.* Статистические методы восстановления пропущенных данных// Cpmputer Modelling&New Technologies. 2002. Vol. 6. No. 1. P. 51 – 61.
11. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
12. *Загоруйко Н.Г.* Методы распознавания и их применение. − М.: Сов. радио, 1972. 216 с.
13. *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т.1. Основные принципы и классические М.: Мир, 1983. 256 с.
14. *Марпл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
15. Россиев А.А. Моделирование данных при помощи кривых для восстановления пробелов в данных. В кн. “Методы нейроинформатики” / Под ред. А.Н. Горбаня. − КГТУ: Красноярск, 1998. − С. 6 – 22.
16. *Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А., Харламов В.А.* Синхронные вариации геомагнитного и микросейсмического полей на ГФО "Михнево" ИДГ РАН// Динамические процессы в геосферах. Вып. 3. М.: ГЕОС, 2012. С. 84 – 91.

УДК 550.3:550.4

ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ТИППЕРА НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

С.А. Рябова, А.А. Спивак, Э.М. Горбунова
ryabovasa@mail.ru, spivak@idg.chph.ras.ru, gorbunova@idg.chph.ras.ru
ФГБУН Институт динамики геосфер РАН, 119334, г. Москва, Россия

Приведены результаты совместного анализа локальных длиннопериодных геомагнитных вариаций и уровня подземных вод безнапорного водоносного горизонта на геофизической обсерватории "Михнево" ИДГ РАН (54,960N; 37,7740E). Определены основные периодичности локальных фоновых вариаций магнитного поля Земли. В результате сравнения годовой цикличности гидрогеологического режима и геомагнитных вариаций показана значимая корреляция между сезонными вариациями магнитного типпера, и изменением уровня подземных вод в безнапорном горизонте.

MAGNETIC TIPPER VARIATIONS AT THE EARTH'S SURFACE DUE TO UNDERGROUND WATER LEVEL CHANGE

S.A. Ryabova, A.A. Spivak, E.M. Gorbunova
ryabovasa@mail.ru, spivak@idg.chph.ras.ru, gorbunova@idg.chph.ras.ru
Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The results of combined analysis of the local long period geomagnetic variations and the underground water level in water-table aquifer at the geophysical observatory "Mikhnevo" of the IDG RAS (54,960N; 37,7740E) were considered. The general periodicities of the local background variations of the Earth were determined. As a results of comparison of season variations of the hydro- geological regime and annual geomagnetic variations significant correlation between magnetic tipper and underground water level in water-table aquifer was determined.

Характерной особенностью магнитного поля Земли является наличие амплитудных вариаций, связанных с возмущающим влиянием внутренних и внешних источников. Геомагнитные вариации, регистрируемые на земной поверхности определяются действием как глобальных источников, связанными с изменением солнечной активности и, как следствие, − ионосферными и магнитосферными возмущениями, так и локальных, интенсивность которых отражает электродинамические и геомеханические свойства приповерхностных участков земной коры, таких как электропроводность, структура среды и ее напряженно-деформированное состояние [1-3]. Одним из важных факторов, определяющих механические и электромагнитные свойства среды, а также закономерности развития геодинамических процессов, является водонасыщенность грунтов.

Для исследования корреляционной зависимости между геомагнитными вариациями фона и режимом подземных вод в качестве характеристики геомагнитных вариаций корректнее всего выбрать вариации магнитного типпера, весьма чувствительного к изменениям свойств среды [2-5].

В настоящей работе рассмотрены результаты синхронной регистрации геомагнитных вариаций и уровня подземных вод безнапорного горизонта на территории Геофизической обсерватории "Михнево" ИДГ РАН (ГФО MHV). Координаты ГФО MHV: 54,959^{o}N; 37,766^{o}E. Территория обсерватории удалена от крупных промышленных объектов и характеризуется относительно ненарушенными, фоновыми параметрами геофизических полей.

Измерения вариаций геомагнитного поля выполнялись в специальном стационарно оборудованном геомагнитном павильоне с помощью трехкомпонентного феррозондового магнитометра LEMI-018, который обеспечивает соответствующее преобразование данных, получаемых с феррозондового датчика, их обработку и накопление.

Наблюдения за режимом безнапорного водоносного горизонта проводились в скважине глубиной 56 м с использованием стандартных электроуровнемеров и прецизионного датчика уровня подземных вод LMP308i, обеспечивающего автоматическую регистрацию уровня воды с дискретностью 1 с и погрешностью не хуже 0,1 мм. При анализе привлечены ряды среднесуточных значений абсолютного уровня h подземных вод. Результаты регистрации геофизических полей на ГФО MHV размещены на сайте ИДГ РАН (idg−copmp/chph/ras/ru/~mikhnevo/data/).

На первом этапе данные инструментальных наблюдений, представленные в виде цифровых временных рядов приводились к эквидистантному виду (восстановление пропусков и исключение выбросов). Затем выполнялась их проверка на случайность с использованием автокорреляционного критерия и фазово-частотного критерия Валлиса-Мура и стационарность [6]. Возможность корректного применения статистических методов обработки к временным рядам определялась с помощью оценки, выполненной в соответствии с законом Бенфорда [7].

Периодичность геомагнитных вариаций анализировалась на основе результатов вейвлет-анализа данных, выполненного с помощью вейвлета Морле [8].

Комплексные коэффициенты магнитного типпера W_{zx} и W_{zy} отражают связь величины напряженности вертикальной компоненты магнитного поля с его горизонтальными компонентами:

$$H_z = W_{zx} H_x + W_{zy} H_y$$

где H_x, H_y и H_z – компоненты регистрируемого магнитного поля, а W_{zx} и W_{zy} – компоненты индукционной матрицы (вектора Визе-Паркинсона).

Магнитуда типпера (абсолютное значение) T задается выражением

$$T = \sqrt{\left|W_{zx}\right|^2 + \left|W_{zy}\right|^2} .$$

Величины W_{zx} и W_{zy} не зависят от фактического источника тока, а определяются, в частности, электропроводностью среды. Разработанные к настоящему времени методики позволяют по данным поверхностных измерений производить не только вычисление магнитного типпера, но также выполнять подавление помех, связанных с шумами различного происхождения, и производить корректную робастную оценку типпера с учетом только магнитотеллурических источников его вариаций [9].

В настоящей работе анализировались локальные длиннопериодные геомагнитные вариации с периодами $T \geq 0{,}5$ сут. Полученные данные свидетельствуют о сложном характере геомагнитных вариаций на ГФО "Михнево". В качестве примера на рис. 1 приведены результаты вейвлет-анализа геомагнитных вариаций за февраль–август 2011 г.

Из представленной скалограммы видно, что выделяется несколько хорошо выраженных периодичностей в вариациях магнитного поля Земли. Обработка данных показывает, что наряду с известными вариациями с периодом около 27 суток и двумя гармониками указанной периодичности в ~6–8 и ~12–14 сут. наблюдаются периодичности локальных вариаций магнитного поля Земли с периодом 57–60 сут, около 180 сут. (рис.2).

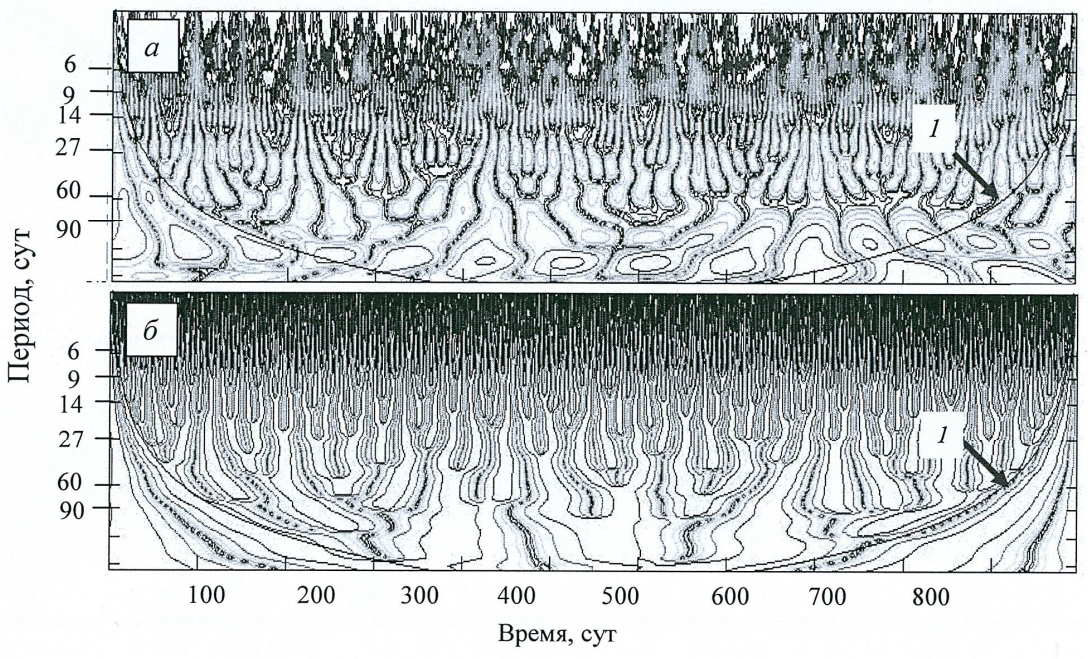


Рис. 1. Результаты вейвлет-анализа горизонтальной компоненты магнитной индукции B_x на ГФО MHV за период 2010 – 2012 гг. (1 – конус влияния); а – амплитуда, б – фаза

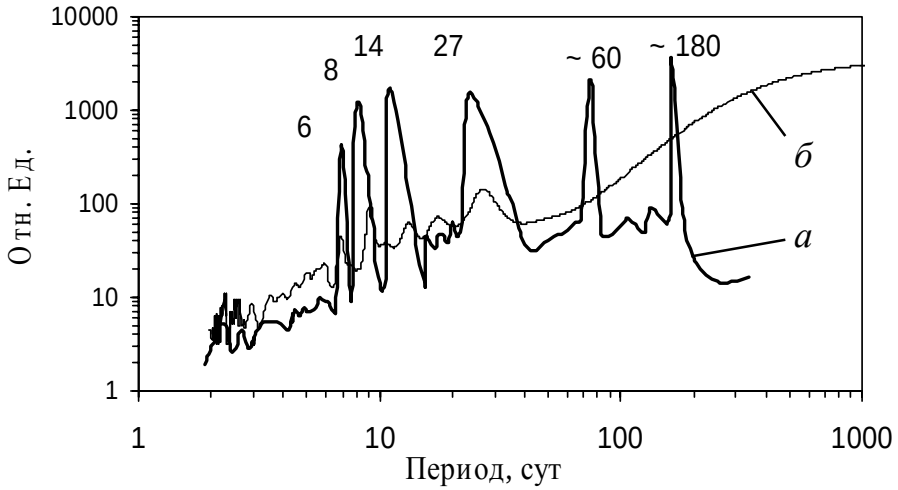


Рис. 2. Глобальный вейвлет-спектр (а) геомагнитных вариаций; а – спектр Фурье;цифры в поле рисунка – характерные значения периодов

На рис. 3 и 4 представлены соответственно вариации уровня подземных вод безнапорного водоносного горизонта период 2009 − 2013 гг. и результаты их вейвлет анализа. Видно, что наряду с сезонными отчетливо выделяются периодичности с периодами 7; 8; 9,5; ~ 14; ~ 60 и ~ 120 сут .

Вычисленные вариации амплитуды магнитного типпера приведены на рис. 5 Для сравнения на этом же рисунке представлены сезонные изменения уровня подземных вод безнапорного каширского водоносного горизонта.

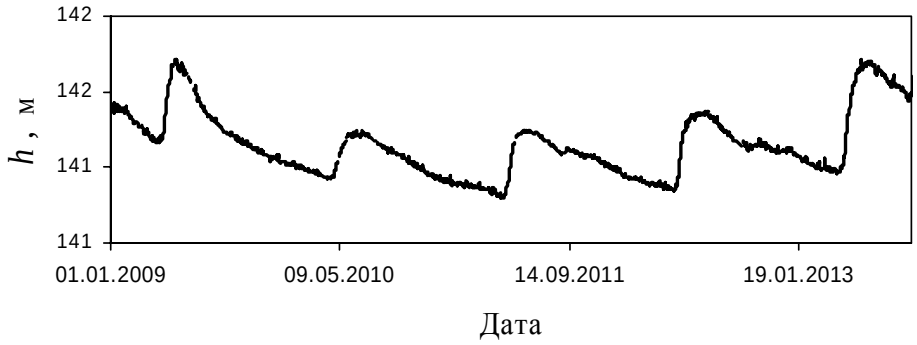


Рис. 3. Изменение уровня безнапорного водоносного горизонта, абс.отм., м

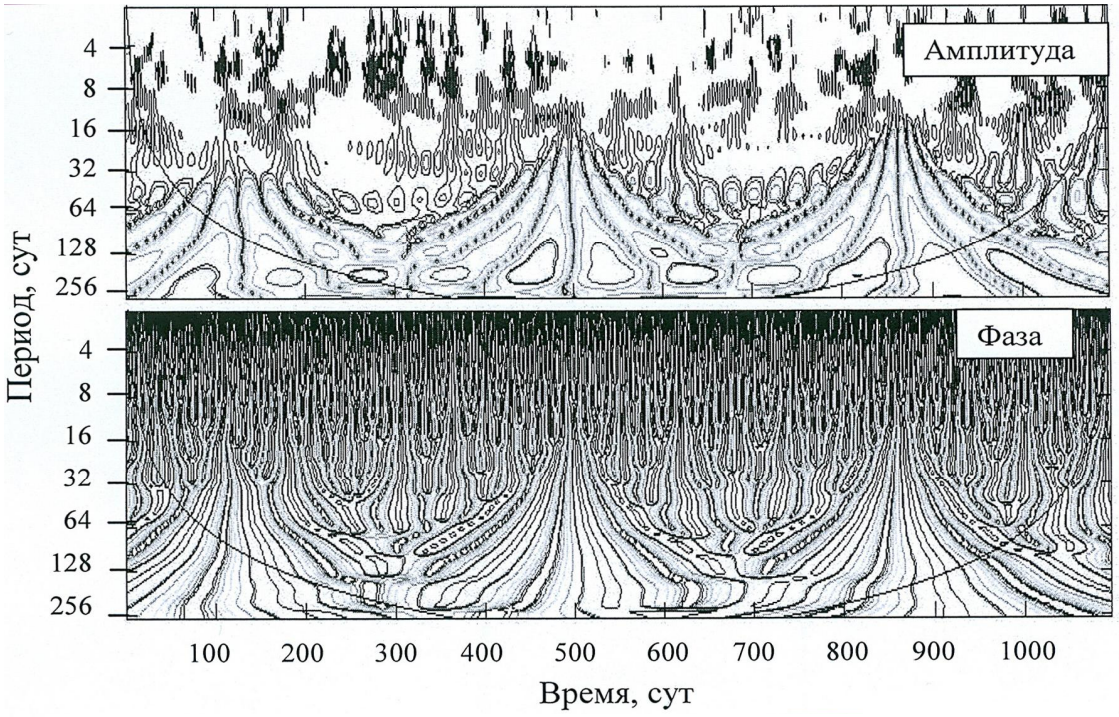


Рис. 4. Результаты вейвлет-анализа вариаций уровня подземных вод за период 2010 – 2012 гг.

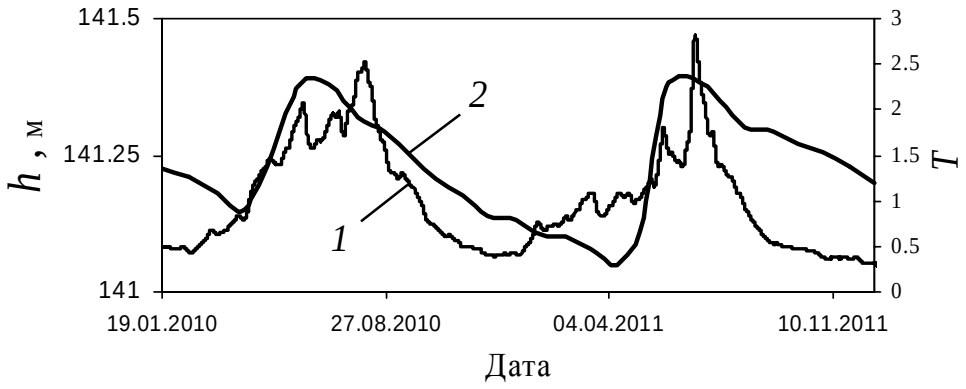


Рис. 5. Вариации магнитного типпера (*1*) и уровня подземных вод (*2*) на ГФО MHV

Данные на рис. 5 свидетельствуют о наличии синхронности в вариациях типпера и уровня подземных вод. Оценка тесноты (силы) связи между двумя рядами данных проводилась с помощью вычисление коэффициента линейной корреляции Пирсона ($K_П$), коэффициентов ранговой корреляции Спирмена ($K_С$) и Кендалла ($K_К$). Результаты расчета коэффициента линейной корреляции Пирсона ($K_П$ = 0,85) свидетельствуют о наличии тесной ($|r| > 0{,}93$) линейной корреляционной связи между магнитным типпером и уровнем подземных вод. Генеральный коэффициент корреляции с вероятностью 99% лежит в интервале $0{,}935 < \rho < 0{,}987$. При использовании коэффициентов ранговой корреляции было получено, что коэффициенты корреляции Спирмена и Кендалла составили соответственно 0,95 и 0,78. При использовании критерия Стьюдента для этих коэффициентов было обнаружено, что эмпирические значения для коэффициентов корреляции Спирмена и Пирсона попадают в критическую область, что подтверждает нулевую гипотезу о значительной корреляционной зависимости между вариациями магнитного типпера и уровнем подземных вод.

Таким образом, показана значимая корреляция между сезонными вариациями одного из основных параметров магнитного поля – магнитного типпера, и изменением уровня подземных вод в безнапорном горизонте.

Обнаруженная связь между локальными вариациями магнитного поля и изменением уровня подземных вод может оказаться также существенной и более сложной в регионах с другими гидрогеологическими режимами подземных вод.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 14-05-00073-а).

Литература

1. *Адушкин В.В., Спивак А.А.* Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 2014. 360 с.
2. *Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Голубцова Н.С. и др.* Магнитовариационное зондирование: новые возможности.// Физика Земли. 2003. № 9. С. 3 - 30.
3. *Жданов М .С.* Электроразведка. М.: Недра. 1986. – 316 с.
4. *Labson V.F., Becker A.* Natural field and very low-frequency tipper profile interpretation on contacts// Geophysics. 1987. Vol. 52. No. 12 , pp. 1697 - 1707.
5. *Vozoff K.* The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins// Geophysics. No.1, 1972. Vol. 37, pp. 98 - 141.
6. *Закс Л.* Статистическое оценивание.- М.: Статистика, 1976.– 598 с.
7. *Berger A.* A basic theory of Benford's law// Probability Surveys. 2011. Vol. 8. No. 1. P. 1 – 126. ISSN: 1549-5787. Doi: 10.1214/11-PS175.
8. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения// Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11. С.1145 – 1170.
9. *Larsen J.C.* Transfer functions: smooth robust estimates by least-squares and remote reference methods// Geophys. J.,1989. Vol. 99, pp. 645 - 663.

УДК 621.039(7+54)

КОНЦЕПЦИЯ КОЛЬСКОГО МЕЖДУНАРОДНОГО КЛАСТЕРА ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАЩЕНИЯ С ВЫСОКОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ И ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

THE CONCEPT OF THE KOLA INTERNATIONAL CLUSTER OF TECHNOLOGIES FOR THE MANAGEMENT OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE AND SPENT NUCLEAR FUEL

Самаров В.Н., Непомнящий В.З. *(фирма «Лаборатория Новых Технологий», Москва, Россия - Калифорния, США)*

Комлева Е.В. *(Институт философии и политологии, Технический университет, Дортмунд, Германия)*

Нами, с учетом разностороннего авторского профессионального опыта, разработана Концепция достаточно полного и завершенного цикла технологий обращения с наиболее опасными радиоактивными материалами. Ниже приведены основные положения Концепции.

ОСНОВАНИЯ:

1) инициативы президента РФ В.В. Путина о расширении спектра международных ядерных услуг (2006г.);

2) научные дискуссии (например, newmdb.iaea.org/GetLibraryFile.aspx?RRoomID=694);

3) уже действующее российское законодательство и потенциально возможное, стимулирующие поиск адекватных научно-технических решений;

4) междисциплинарный подход и тенденции интернационализации усилий (http://viperson.ru/wind.php?ID=678896) в сфере ядерной и радиационной безопасности;

5) арктический вектор развития России и Мурманской области.

ЦЕЛИ:

1) объединение современных научно-технических решений, материаловедческих и горно-геологических, для повышения эффективности среднесрочной и долговременной изоляции российских и зарубежных (либо изначально зарубежных) радиоактивных материалов (прежде всего, высокоактивных отходов - ВАО и отработавшего ядерного топлива - ОЯТ) от биоты;

2) расширение геополитического значения и международных функций Мурманского транспортного узла;

3) поддержка и модернизация промышленного потенциала Мурманского побережья и Печенгского района Мурманской области.

ГОРЯЧЕЕ ИЗОСТАТИЧЕСКОЕ ПРЕССОВАНИЕ (ГИП) И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ КОНТЕЙНЕРОВ/ПЕНАЛОВ С ВАО/ОЯТ

а) Основа ГИП-технологии – пластическая деформация (в замкнутом объеме газостата) внешней оболочки герметизируемых упаковок, циркония и засыпного материала при высоких давлении и температуре в атмосфере инертного газа.

б) Суть новой технологической идеи: адаптация освоенных в аэрокосмической промышленности методов и средств для герметизации и омоноличивания ВАО/ОЯТ (один из прецедентов, американо-австралийский, адаптации и поставщиков оборудования применительно к некоторым другим видам радиоактивных материалов - http://labdepot.ru/images/file/AIP/Utilizacyia%20radioaktivnih%20othodov%20s%20ispolzovaniem%20metoda%20HIP.pdf; https://www.google.ru/search?hl=en-RU&source=hp&q=ANSTO+HIP+of+nuclear+wastes&gbv=2&oq=ANSTO+HIP+of+nuclear+wastes&gs_l=heirloom-hp.12...1610.14047.0.15188.29.9.0.20.20.0.63.532.9.9.0.msedr...0...1ac.1.34.heirloom-hp..20.9.532.jhcqnHbRr-0).

в) Варианты материала оболочки:
- нержавеющая сталь;
- карбид кремния;
- алюминиевые сплавы;
- новые камнеподобные материалы на основе природных минералов.

г) Варианты засыпного материала:
- ферробор;
- природные минералы, способные, в частности, модифицироваться в герметики, эффективно поглощать тепловые нейтроны и/или сорбировать радионуклиды (Komlev V.N. Use of Natural Materials from Northern Russia for the Isolation of Radioactive Wastes and Spent Nuclear Fuel / NATO ASI Series, Defence Nuclear Waste Disposal in Russia: International Perspective, 1998, 85-98; Мельников Н.Н., Конухин В.П., Комлев В.Н. Материалы на основе минерального и техногенного сырья в инженерных барьерах для изоляции радиоактивных отходов. – Апатиты, 1998, Изд. Кольского НЦ РАН. – 94 с.; аналогия - технология Synrock, Synthetic Rock, которая очень хорошо обоснована по части физики и геохимии, разработана, широко описана и уже применяется австралийцами, ANSTO, в связке с газостатами AIP).

ПЛОЩАДКИ РАЗМЕЩЕНИЯ ГАЗОСТАТОВ

Варианты:
- РТП «Атомфлот», Мурманск;
- «Дальние Зеленцы» (пос. Порчниха);
- Центр кондиционирования и хранения радиоактивных отходов (РАО) «Сайда-Губа», СевРАО;
- База хранения ОЯТ/ВАО «Губа Андреева», СевРАО;
- п. Никель/г. Заполярный, замещение выбывающей со временем металлургической/обогатительной инфраструктуры ОАО «ГМК 'Норильский никель'»;
- предварительно ГИП-технология/ее элементы могут быть отработаны по новому назначению под контролем и при участии специалистов Росатома при одной из ближайших АЭС (в городах Полярные Зори либо Сосновый Бор), в крайнем случае (на неактивных моделях), - в Австралии или на площадке «Лаборатории Новых Технологий» в Калифорнии.

ПЛОЩАДКИ НАЗЕМНОГО ВРЕМЕННОГО СКЛАДИРОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ/ПЕНАЛОВ С ВАО/ОЯТ

Варианты:
- Центр кондиционирования и хранения РАО «Сайда-Губа», СевРАО;
- База хранения ОЯТ/ВАО «Губа Андреева», СевРАО.

ПЛОЩАДКИ ПОДЗЕМНОГО ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ/ЗАХОРОНЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ/ПЕНАЛОВ С ВАО/ОЯТ

В контексте времени и потенциальной опасности - это главное звено Концепции.

Варианты:
- «Дальние Зеленцы» (пос. Порчниха), определена как наилучшая (но с излишними, неадекватно международным реалиям, ограничениями: только для РАО гражданских объектов Северо-Запада РФ, без ОЯТ, не вблизи месторождений полезных ископаемых) по состоянию на 2000г. (http://www.opec.ru/news.aspx?id=221&ob_no=86000), проект NUCRUS 95410 программы TACIS, западноевропейский консорциум (фирмы SGN-ANDRA-ANTEA, Франция и Tractebel/Belgatom, Бельгия), ВНИПИЭТ и Горный институт КНЦ РАН;
- «Печенга» (вблизи п. Никель и г. Заполярный, при выборе площадки «Дальние Зеленцы» не рассматривалась, так как попала под ограничения проекта NUCRUS 95410, неуместные сейчас), замещение выбывшей и выбывающей горной инфраструктуры ОАО «ГМК 'Норильский никель'» (глубокий карьер, подземные выработки и сочетание сооружений под и над земной поверхностью), потенциальную возможность наличия принципиально

пригодных для размещения ВАО породных толщ независимо показали Ф.Ф. Горбацевич (Геологический институт КНЦ РАН, 1994г., устное сообщение, исследование керна СГС-3), Ю.И. Кузнецов (МНТЦ, «Герс», проект № 262, исследование керна СГС-3, 1994-1996гг., http://www.istc.ru/istc/db/projects.nsf/0/95B6194D05AA3BB6C3256C8C003EC62D?OpenDocument), В.Н. Комлев и др. (данные по разведочным скважинам, 1999г., http://www.biodiversity.ru/publications/arctic/archive/n12/nikel.html), А.С. Сергеев и Р.В. Богданов (Тез. докладов конференции "Радиационная безопасность: радиоактивные отходы и экология". – Санкт-Петербург, 1999, исследование керна СГС-3).

ПРИМЕЧАНИЕ:
1) подобный подход к организации работ с российскими/зарубежными ВАО/ОЯТ (ГИП-кондиционирование + существующая ядерная, геологическая и горная инфраструктура) может быть реализован и относительно Урала (в том числе, с привлечением исследований по СГС-4), Камчатки, Магаданской области, Якутии, Красноярского края и Краснокаменска;
2) основные положения Концепции рассмотрены и одобрены Научным советом по металлургии и металловедению ОХНМ РАН.

УДК 621.039(7+54)

ЭВОЛЮЦИЯ КОНЦЕПЦИЙ ХРАНЕНИЯ/ЗАХОРОНЕНИЯ ОЯТ/РАО

В.Н. Самаров, В.З. Непомнящий *(фирма «Лаборатория Новых Технологий», Москва, Россия - Калифорния, США), <samarov13@aol.com>*

Е.В. Комлева *(Технический университет, Дортмунд, Германия), komleva_ap@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрены этапы исследований подземного хранения/захоронения ОЯТ/РАО. Отмечено появление нового потенциально значимого способа кондиционирования утилизируемых материалов. ГИП-кондиционирование может как результативно дополнить классические технологии хранения/захоронения, так и послужить основой новых. Приведен пример горно-геологических условий, для которых применение ГИП-кондиционирования и новых технологий наиболее вероятно при создании международного хранилища/могильника с наибольшим эколого-экономическим эффектом.

EVOLUTION OF CONCEPTS FOR STORAGE/BURIAL OF SPENT NUCLEAR FUEL/RADIOACTIVE WASTE

Victor Samarov, Vitaly Nepomnutshy *(LNT PM Inc., Garden Grove, CA, USA), samarov13@aol.com*

Elena Komleva *(TU Dortmund, Germany), elena.komleva@tu-dortmund.de*

Abstract. There are considered research stages of underground storage/burial of spent nuclear fuel/radioactive waste. A new potentially important way of conditioning utilized materials is pointed out. HIP-conditioning can both effectively complement the classical technologies of storage/burial and become a basis for the new ones. There is given an example of mining and geological conditions being the most potential to apply the HIP-conditioning and new technologies by construction of an international depository/final storage facility with the best ecological and economic effects.

ВВЕДЕНИЕ

В 2008г. в ГД РФ обсуждались правовые условия организации в России международных хранилищ ОЯТ (отработавшего ядерного топлива) под контролем МАГАТЭ. Сообщалось, что «сегодня хранение 1 кг ОЯТ или твердых ВАО (высокоактивных отходов) стоит около 2500 долларов». Ранее нами предложено применять горячее изостатическое прессование (ГИП) для кондиционирования контейнеров/пеналов с ВАО/ОЯТ. В настоящей статье рассмотрено предположение о влиянии ГИП-кондиционирования (ГИП-К) на составляющие процесса хранения/захоронения этих материалов. Это влияние может инициировать серьезные изменения подходов к завершению ядерного топливного цикла и позитив в сферах ядерной/радиационной безопасности и экономики.

ИСТОРИЯ И ТЕОРИЯ

1. Рассматриваем лишь один из вариантов последней стадии обращения с ВАО/ОЯТ – их захоронение. Он в международном контексте является основным. Захоронению во многом технологически близок вариант долговременного подземного хранения.

2. Доминирующим является вариант захоронения ВАО/ОЯТ с применением специальных подземных комплексов. Зарубежные исследования таких комплексов имеют историю 40-50 лет. Некоторые объекты уже находятся на пороге строительства. Позитив: исследования и строительство детально проработаны, нельзя для классического магистрального направления (Швеция, Финляндия, Канада – скальные породы высокого качества) существенно улучшить проекты в части безопасности. Компромат могут найти лишь в тех случаях, когда разработчики отступают от магистрального направления или по типам пород (туфы – США, мерзлота, известняки, гнейсы – Россия), или по технологии поэтапного выбора площадки (Красноярск). Негатив: сохраненное для многократно зарезервированного запаса безопасности устремление к уникальности и сложности комплексов привело к удорожанию и без того затратных подземных работ.

3. Немного подробней о недостатках процесса как бы выбора площадки вблизи Красноярска. Или ИСТОРИЯ И ТЕОРИЯ ПО-РОССИЙСКИ.

Есть «Материалы обоснования лицензии…» по Красноярскому федеральному могильнику и подземной исследовательской лаборатории - ПИЛ. Решением о месте

размещения объектов является схема территориального планирования РФ в области энергетики, распоряжение Правительства РФ от 11.11.2013 № 2084-р. Исполнитель - ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» - НО РАО.

Интересный документ. Комментируем лишь часть. Табл. 8.1 (т. 3, ответы на вопросы граждан): п. 6.2. «В соответствии с ранее выполненными НИОКР существующие объекты ФГУП ФЯО «ГХК» не применимы для целей надежной окончательной изоляции заявленных количеств РАО 1 и 2 классов» (где опубликованы результаты этих НИОКР, как они соотносятся с решением изолировать промышленные реакторы/хранилища пульп на месте их эксплуатации, а также с позитивным настроем относительно 40-летних исследований в как бы ПИЛ – подземных выработках ГХК, а если из существующих подземных объектов заложить новые в новые части массива – они подойдут для РАО?); п. 8.10. Ответ о неприеме зарубежных отходов ошибочен. Противоречит «Программе развития Кластера инновационных технологий ЗАТО Железногорск», Международному центру ГХК по обращению с ОЯТ и РАО. НО РАО ищет зарубежных инвесторов; п. 8.15. «Место расположения планируемого объекта и его первой очереди – ПИЛ… в границах промышленной площадки ФГУП «ГХК»…»; п. 9. «Организация системы физической защиты будет полностью соответствовать требованиям действующих норм и правил в области использования атомной энергии»; пункт 15.3 и др. «Транспортировка больших объемов РАО… с повышенной опасностью…»; пункт 27.11 и др. Ошибка: часть работ - иностранные деньги (проекты МНТЦ); п. 28.1 «В Москве… отсутствуют высококвалифицированные специалисты…».

Кратко обобщаем смысл этих цитат/ответов:

московские специалисты указанной в п. 28.1 квалификации,

умалчивая/не зная о том, что причиной назначения Железногорска местом для создания могильника являются задачи по расширению ГХК,

подтверждая непригодность горного массива промплощадки ГХК для захоронения,

заявляя вопреки всей международной теории и практике о главном критерии выбора площадки для федерального/национального объекта не по принципу качества пород путем сравнения вариантов для территории страны в целом,

ошибаясь или лукавя в ответах (в частности, по поводу бывшего зарубежного финансирования и будущего статуса объекта),

убеждены, что дорогую отдельную ПИЛ, для обоснования которой по состоянию на 2009г. пробурена лишь одна «глубокая», 600-метровая, скважина, на промплощадке ГХК заново строить нужно (не делая даже попытки экономить на стадии предварительных исследований за счет затратных горных работ в условиях, когда в существующих подземных сооружениях ГХК такие исследования аналогичных вновь предлагаемым в пределах одной промплощадки горных пород возможны, тем более возможны во вновь созданных для РАО и их имитаторов с меньшими затратами дополнительных камерах единого подземного комплекса ГХК, который вечно работать под вчерашние и сегодняшние задачи не будет),

забыв, что ранее специально для выполнения функций ПИЛ на ГХК создали Научно-производственный центр геомониторинга, считали полезным «для отработки в натурных условиях технических решений по строительству и эксплуатации ПИЛ в существующих сооружениях подгорной части ГХК… создать филиал подземной лаборатории… целесообразно использовать существующие подземные сооружения и рассматривать их в качестве первой очереди подземной лаборатории» и утверждали: «Требуется продолжение исследований по варианту размещения могильника с использованием существующих подземных выработок…», а также «Уникальный подземный комплекс ГХК представляет… возможность отработки технологии… практического изучения… процессов в породном массиве, которые будут протекать при окончательной подземной изоляции РАО»,

предлагают обществу верить, что, потратив затем миллиарды долларов, в 4 км от Енисея, возможно, удастся надежно изолировать самые опасные РАО и обеспечивать их физическую защиту до миллиона лет по правилам сегодняшней энергетики, хотя могильник вообще не предназначен производить энергию, поэтому схемами размещения энергетических объектов регламентироваться не должен (ни одна страна в мире так не делает).

Предлагаемая в том же самом горном массиве самостоятельная ПИЛ никогда не превзойдет по степени геологической изученности массива подземные сооружения ГХК. Прежде чем говорить об отдельной ПИЛ, достигнутый уровень знаний о массиве нужно бы детально изложить и обсудить. Горные выработки – последняя инстанция при горно-геологической оценке. Они есть у ГХК. Следовательно, для первой и важнейшей задачи – оценки пригодности геологической среды такая ПИЛ вряд ли нужна.

На многократно повторенный в таблице 8.1 вопрос «Почему объект строится в Железногорске?» ответ фактически не дан. Объект федеральный, но никаких альтернативных вариантов по России даже приличия ради не предусматривалось, а «аккомпанируют» Росатому лишь жители ведомственного ЗАТО!? Напомним, как диаметрально противоположно изменилась ситуация вокруг Железногорска. Площадку выбирали под исключительно военно-промышленный объект. При дефиците времени на геологию. При минимальной связи с внешним миром. Без крупного водоема объект работать не мог. Сейчас ГХК, трудно и долго перестраиваясь, практически полностью занят по гражданской тематике. Появилась необходимость в опасных перевозках ОЯТ/ВАО по железной дороге с суммарным пробегом в миллионы км. Появилась необходимость в могильнике, для безопасности которого крупный водоем рядом – плохо. Объект становится значимым на миллион лет и на миллиарды долларов затрат. Клиентами ГХК стали не только предприятия России, но и мира. А площадка – одна и та же!? Вот к чему приводит цепочка решений, которые, видимо, слабо оценивались в связке. Ну, надо же приостановиться, перестать в спешке надстраивать все новые пристройки на старый «фундамент», который к тому же и не для них закладывался.

Вообще, история развития инноваций в Железногорске под эгидой Росатома указывает на дисбаланс между прогнозами и результатами. Относительно могильника, при значительной неопределенности горно-геологических и социально-политических условий в интервале миллиона лет, этот дисбаланс может быть катастрофическим. Кто мог предсказать 150 лет назад, что Россия дважды сменит государственный строй, переживет две мировые войны и будет жить под дамокловым мечом глобального терроризма? Можно ли создавать объект, когда социально-политический базис его функционирования принципиально непредсказуем, а индивидуальное и общественное сознание далеки от идеального?

4. ГИП-К еще повысит избыточно высокую экологическую (геологическую и технологическую) безопасности таких классических зарубежных комплексов. У шведов до сих пор (с ориентацией на выполнение норм безопасности в интервале 100 тысяч лет) есть «ряд вопросов» к технологии изготовления медно-чугунных контейнеров хранения ОЯТ. Но надеяться при вычленении отдельных затрат на значимый плюсовой экономический эффект от применения ГИП-К на таком магистральном пути не стоит.

5. Еще в пору расцвета классических представлений ФРГ и ГДР показали на практике принципиальную возможность использования для захоронения РАО или ПИЛ готовых выработок подземных рудников («Ассе», «Конрад», «Морслебен»). С другой стороны, все остальные так часто упоминаемые специалистами Росатома зарубежные ПИЛ создавались «с нуля» потому, что рядом не было готовых подземных сооружений. Отдельная ПИЛ при наличии в ее ближней зоне готовых горных выработок – нонсенс.

СОВРЕМЕННЫЙ ПРАГМАТИЗМ

1. Тенденция, отмеченная главой МАГАТЭ. «Идея обращения с ОЯТ с участием нескольких стран уже назрела, в этой области ведутся исследования, но я считаю, что это тема должна обсуждаться в будущем», – сказал Ю. Амано, отвечая на вопрос о возможности создания международных центров для различных стадий ядерного топливного цикла.

2. Новые, «постклассические», исследования уже намечают, можно сказать, прорывные направления. Например, ставшая возможной только сейчас менее затратная технология Великобритании – глубокие (до 5 км) скважины большого (до 60 см) диаметра.

3. Потенциям подобных прорывных направлений независимо от них создают благоприятную правовую базу. Например, в России. Федеральный закон от 11 июля 2011 г. N 190-ФЗ фиксирует, соответственно реальным трудностям приближающегося практического этапа вывода из эксплуатации ядерных объектов с наработкой большого объема отходов, явную и объективную тенденцию расширительного толкования мест их захоронения, вводя возможность захоронения «особых отходов» там, где первоначально это

не предполагалось и возможность этого не изучалась. Полезно, правда, помнить и обдумать в «общем строю» впечатляющие примеры мест захоронения «особых отходов» - Чернобыль и Карачай. К сожалению, российские нормативно-правовые документы часто при таком расширительном подходе (в целом позитивном) не имеют фильтров против субъективных оценок экологической безопасности, вплоть до подмены понятий (гранитоиды Нижнеканского массива и гнейсы Атамановского кряжа Красноярского могильника и ГХК, – не одно и то же). Росатом расширяет спектр «особых отходов»: технологии захоронения военных реакторов и хранилищ жидких радиоактивных отходов СХК (Томск), как и в Железногорске, непосредственно на месте их расположения и обещает тиражировать эти технологии далее. Не хотелось бы, чтобы подобное тиражирование затронуло РБМК ЛАЭС-1, а потом и других гражданских станций. Не обойдется без курганной технологии изоляции остановленных АЭС.

4. В последнее время даже по отношению к ВАО в России применяют/допускают долговременную изоляцию на дневной поверхности.

5. ГИП-К на таком «постклассическом» пути может очень даже быть востребованным. Оно позволит соединить достоинство классики (магистрально выбранные скальные породы) и современных направлений (устремленность без потери экологического качества на упрощение и удешевление применяемых горных технологий и комплексов). А также – снизить риск негативных последствий от завышенных оценок защитных свойств вмещающих хранилища пород. Доля от ГИП-К в экономическом эффекте уже может быть заметной.

ЭФФЕКТ ИЗБАВЛЕНИЯ ОТ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЗАХОРОНЕНИЯ

1. Финляндия. Стоимость хранилища - 3,3 млрд долларов. Вместимость - 12000 тонн топлива. Удельные капитальные затраты при захоронении ОЯТ - 275 000 долл./т.

2. США, Юкка-Маунтин, вместимость 77000 тонн, стоимость росла, при оценке в 100 млрд долларов проект закрыт, прогноз затрат - 1 300 000 долл./т.

ТАКИМ ОБРАЗОМ: оценки удельных капитальных затрат при классическом захоронении ВАО/ОЯТ колеблются в пределах 275 – 1 300 тыс. долларов за тонну (оценки объективно занижены, так как при реальном строительстве затраты будут больше).

3. Объем ВАО и САО для Красноярского могильника планируется только от ГХК, СХК и ПО «Маяк» не более 160-200 тыс. куб. м. По другим данным – 500 тыс. куб. м.

4. Эксплуатационные классические расходы будут не меньше новых.

5. Если ГИП-К обеспечит герметичность упаковок на 100-1000 лет, то для новых направлений захоронения роль других инженерных и геологических барьеров снижается, их можно минимизировать и весь эффект от разницы капитальных затрат - отнести на его долю.

6. Пример «постклассических» технологий. Выводимый из эксплуатации карьер «Центральный» Кольской ГМК. Проектная глубина - 400 м, доступный объем – сотни млн куб. м. Для сравнения: В РФ было удалено в глубокие горизонты-коллекторы около 50 млн. м3 жидких РАО. Ситуация изначально была более тяжелой – отходы в подвижной форме. Но геологические условия заблокировали им выход на земную поверхность. Капитальных затрат при использовании карьера в качестве могильника твердых отходов практически не требуется. Возможно изолировать объемы ВАО/ОЯТ, эквивалентные объемам СОТЕН классических объектов подземного захоронения шведско-финских, СОТНИ объектов типа Юкка-Маунтин/Красноярского и СОТЕН объектов согласно недавно предложенной курганной технологии. При необходимости хватит места и для других категорий РАО. Тем более, что от подземного могильника РАО «с нуля» в Ленинградской области готовы отказаться из-за его высокой стоимости. Если Росатом запустил в производство засыпку своих выведенных из эксплуатации объектов тут и там, то почему не делать изоляцию наиболее опасных отходов в глубоком и вместительном карьере в малонаселенной местности?

Напорных глубинных/артезианских вод в карьере нет (как не замечены они многолетней практикой и в подземных рудниках Печенги). Аналоги Енисея рядом не просматриваются. Системой горных выработок территория в глобальном смысле дренирована. Свежая вода атмосферных осадков с глубин 300-400 м вверх к земной поверхности не пойдет. К тому же имеет место переток воды со дна карьера в подземные выработки рудника «Северный Глубокий» (что гарантированно исключит даже

теоретическую возможность появления переносчика радионуклидов к земной поверхности). Система «карьер-подземный рудник» обеспечивает для могильника во вмещающем горном массиве дополнительный защитный барьер – воронку депрессии. Вода осадков со дна карьера посредством естественного дренирования будет уходить в «пруды-отстойники» огромных объемов подземного рудника либо дренировать на большие глубины внутри пород Земли. Вода будет уходить со дна карьера, всегда подвергаясь очистке (если будет ее загрязнение в зоне размещения РАО/ОЯТ) в огромных подземных пространствах. «Северный Глубокий» - уникальный рудник, который ко времени обустройства и эксплуатации карьера по новому назначению будет также закрыт из-за исчерпания руд. «Северный Глубокий», сочлененный с карьером «Центральный», - один из крупнейших подземных рудников в цветной металлургии (глубина ствола - 1280 м). Объемы его отработанного пространства - резерв не только для направленного и без участия человека отвода воды из карьера, но и, при необходимости, для образования дополнительных секций могильника.

Для унификации работ в зоне размещения ВАО/ОЯТ применительно к Печенге многие операции и оборудование могут быть заимствованы из предложений для Красноярского могильника. Россия может применить здесь дополнительно технологию глубоких скважин. ПИЛ, проектируемая для Красноярска, может быть с большей пользой реализована на Печенге. И «засыпку в карьере» по задумке можно делать как в Томске, Железногорске и на будущих объектах курганной технологии, а по исполнению – лучше и дешевле, так как на Кольском полуострове ассортимент минеральных буферных заполнителей с разными функциями защиты обширней. Печенгская ПИЛ (в готовых выработках или сопряженная с ними) положит начало новому ГХК – уже международному и в условиях хорошо изученных и пригодных для захоронения ВАО/ОЯТ геологических формаций. ГХК, который объединит новый способ кондиционирования изолируемых материалов и наземно-подземный способ их размещения. Международному с самого начала и открыто. А не как Красноярский могильник, который исподволь готовят как международный. Экономия только на капитальных горно-строительных затратах при переходе от национальных классических подземных могильников к такому международному объекту составит СОТНИ млрд долларов.

На наш взгляд, на Кольском полуострове действительно стратегическую, особую, непривычную для широкого круга специалистов перспективу (если понимать под стратегическим период не в 10-20 лет) имеют в немалой степени объекты Норникеля, которые необходимо комплексно с новым целеполаганием изучить и адаптировать к задачам Росатома и международным потребностям. Кроме того, вниманию Росатома могут быть предложены закрывающиеся/закрывшиеся/работающие не с полной нагрузкой подземные сооружения других владельцев. Системой «карьер-подземный рудник» (карьер «Центральный и рудник «Расвумчорр») уже несколько десятков лет обладает комбинат «Апатит» группы «ФосАгро», будет обладать Оленегорский ГОК группы «Олкон». Есть и другие карьеры на Кольском полуострове, без сопряженных с ними подземных выработок. Но и они могли бы быть полезны, так как бурить со дна карьера скважины большого диаметра или проходить дополнительные подземные выработки все же дешевле, чем с исходной земной поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целесообразно выполнить: 1). Теоретическую и экспериментальную актуализацию освоенной в ведущих отраслях промышленности ГИП-технологии для другой важной цели - кондиционирования ОЯТ/ВАО как дополнения планируемых (Железногорск) или основы новых (Печенга) технологий их захоронения; 2). Анализ альтернативных технологий захоронения в России на примере Нижнеканского массива и Печенгской формации и определение роли в них ГИП-К с позиций безопасности и экономики подземных объектов.

УДК 621.317.1: 550.837.6

ПОИСК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО ФАЗОВОМУ ПАРАМЕТРУ

***А.И. Сарвартинов, Е.В. Арзамасцев**, authur82@mail.ru*
Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

Рассмотрен метод поиска глубинных электромагнитных аномалий и неоднородностей по фазовому параметру. Показаны необходимые условия и технические решения для практической реализации фазового метода.

SEARCH OF THE ELECTROMAGNETIC INHOMOGENEITIES ON THE PHASE PARAMETER

***A.I. Sarvartinov, E.V. Arzamascev**, authur82@mail.ru*
Institute of geophysics of Ural department of the RAS, Ekaterinburg, Russia

The method of search deep electromagnetic anomalies and irregularities in the phase parameter considered. The necessary conditions are discusses, and the technical solutions that enhance the efficiency of the phase method at low frequencies are shown.

Введение. В электромагнитных методах, применяемых в электроразведке и инженерной геофизике, основным информативным параметром является амплитуда электромагнитного поля. Второй информативный параметр – частота, применяется главным образом для определения глубины проникновения электромагнитной волны в геофизических методах электроразведки (частотное зондирование) или определения толщины проводника в дефектоскопии. Третий волновой параметр, – фаза, как правило, применяется лишь во вспомогательных целях. Либо для синхронного детектирования при обнаружении слабых сигналов электромагнитного поля, либо при обработке результатов амплитудных измерений с целью выделения электромагнитных аномалий по вторичному электромагнитному полю, создаваемому аномалией. Тем не менее, фаза электромагнитных колебаний в некоторых случаях вполне может быть использована, как прямой электромагнитный параметр, по которому можно судить об электромагнитной аномалии. Ранее уже было предложено использовать фазовый параметр в геофизике для поиска рудных месторождений методами вызванной поляризации на инфра низких частотах [1], но эта задача при имевшемся уровне состояния измерений в то время оказалась практически неразрешимой. Современные средства измерительной и электронно-вычислительной техники могут существенно увеличить точность определения фазового угла на низких частотах, что позволяет применить фазовый метод в геофизике на новом уровне.

1. Обоснование метода

При взаимодействии электромагнитной волны с металлическими проводниками или с достаточно крупными включениями горных пород, имеющими электромагнитные свойства, существенно отличающиеся от свойств основного массива, возникает вторичное электромагнитное поле, сдвинутое по фазе на $\pi/2$ по отношению к первичному полю (полю возбуждения). То есть в области таких аномальных включений может изменяться не только амплитуда, но и фаза электромагнитного поля. Измерительный прибор (например, магнитометр) всегда фиксирует амплитуду векторной суммы первичного и вторичного полей. Любое отклонение фазы измеряемого электромагнитного поля от нулевого значения по отношению к фазе первичного электромагнитного поля является признаком присутствия электромагнитной аномалии вблизи точки измерения. Определяя зависимость величины фазового угла электромагнитного поля от расположения точек измерения (по профилю или по площади) можно построить графики, показывающие наличие и распределение электромагнитной аномалии на исследуемом участке. При этом необходимым условием для

реализации метода является получение высокой разрешающей способности по фазовому углу во всем динамическом диапазоне измерений.

С целью проверки работоспособности фазового метода и отработки методик его практического применения было проведено моделирование на рабочем макете аппаратуры в малой токовой петле в лабораторных условиях. Результаты такого моделирования показали, что при внесении в зону токовой петли металлических предметов надежно регистрируется фазовый сдвиг между опорным сигналом и сигналом, регистрируемым магнитометром внутри токовой петли. Несколько меньший, но вполне разрешимый фазовый сдвиг вызывают и куски пирита массой от килограмма и более. В то же время десятки килограммов магнетита не вызывали заметного изменения фазового угла, хотя амплитуда регистрируемого переменного магнитного поля заметно увеличилась по причине высокой магнитной проницаемости магнетита. То есть данный фазовый метод может быть эффективен для обнаружения металлических проводников и некоторых видов горных пород, в частности, сульфидов. Если в случае металлических проводников фазовый сдвиг возникает по причине эффекта самоиндукции в металлах, то в сульфидах фазовый сдвиг вызван их высокой динамической поляризацией. Кроме того, небольшой фазовый сдвиг был получен при возбуждении резервуара с водой электрическим полем низкой частоты, причем изменение фазы регистрировалось по магнитной составляющей электромагнитного поля.

Техническая реализация метода

Для эффективного применения метода поиска неоднородностей по фазовому параметру необходимо выполнить некоторые условия и применить ряд технических решений, направленных на получение достоверных и повторяемых результатов измерений малого фазового сдвига. Как и во всех активных методах, в данном методе применяется возбуждение исследуемого участка электромагнитным полем заданной частоты и формы. Собственно фазовый сдвиг определяется следующим образом. Сигнал электромагнитного поля заданной частоты и опорный сигнал от генератора возбуждения оцифровываются с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) в течение нескольких десятков периодов частоты возбуждения, записываются на компьютер и раскладываются по частотам с помощью дискретного преобразования Фурье. Затем амплитуды опорного сигнала и сигнала частоты возбуждения комплексно делятся друг на друга. Из отношения действительной и мнимой частей комплексного числа, образованного в результате деления, получается тангенс фазового угла между сигналом измеряемого электромагнитного поля и опорным сигналом основной частоты возбуждения, после чего вычисляется угол фазового сдвига. При прямоугольной форме сигнала генератора возбуждения таким же образом можно определить сдвиг фаз на нечетных гармониках частоты возбуждения. Анализ частотной зависимости фазового сдвига позволяет получить дополнительную информацию о расположении электромагнитной аномалии, что может способствовать более точному определению глубины и характеристик объекта, вызвавшего электромагнитную аномалию.

С помощью накопления сигнала достигается увеличение отношения сигнала к шуму, что повышает точность определения фазового сдвига. Определение фазового сдвига на основной частоте возбуждения (или ее нечетных гармониках) увеличивает помехозащищенность метода по сравнению с определением фазового сдвига по фронту импульса, особенно при наличии внешних электромагнитных помех. При удаленном расположении приемника электромагнитных колебаний от генератора возбуждения синхронизация осуществляется с помощью GPS-приемников. В этом случае сигнал первого GPS-приемника используется в качестве задающего для генератора возбуждения, а сигнал второго GPS-приемника подается на опорный вход АЦП. Блок-схема аппаратурного комплекса, предназначенного для реализации фазового метода, показана на рис. 1.

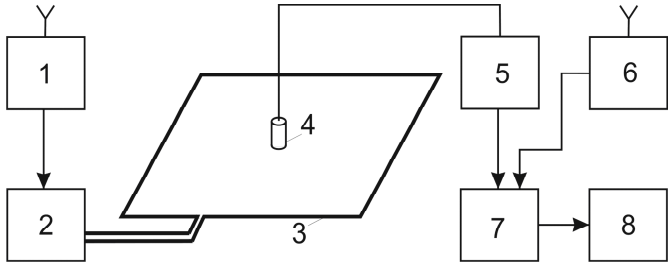


Рис.1. Блок-схема установки для нахождения фазового угла между сигналом измеряемого переменного магнитного поля и сигналом генератора возбуждения первичного магнитного поля в токовой петле. 1 – GPS-приемник; 2 – генератор прямоугольных импульсов; 3 – токовая петля; 4 – датчик магнитомодуляционного преобразователя магнитной индукции; 5 – магнитомодуляционный преобразователь; 6 – GPS-приемник; 7 – АЦП ; 8 – компьютер.

При измерении фазового сдвига необходимо использовать широкополосный приемник электромагнитного поля. Например, это может быть магнитометр с плоской амплитудно-частотной характеристикой во всем диапазоне частот измеряемого магнитного поля и с достаточным динамическим диапазоном измерения. Для этой цели могут быть использованы феррозондовые магнитометры с соответствующими техническими характеристиками или широкополосные магнитомодуляционные преобразователи с аморфным ферромагнитным сердечником, работающие на основной частоте возбуждения. Применение пассивных индукционных датчиков приводит к недопустимому увеличению погрешности определения фазы. Так, индукционный датчик с ферромагнитным сердечником и с линейной коррекцией амплитудно-частотной характеристики показал почти в сто раз больший разброс результатов измерений фазы по сравнению с магнитомодуляционным датчиком в одних и тех же условиях измерения.

3. Опробование метода на геологическом объекте

Фазовый метод поиска электромагнитных аномалий был опробован на геологическом объекте – участке Чусовского медноколчеданного месторождения с залеганием рудного тела на глубине более 100 метров. Первичное электромагнитное поле создавалось токовой петлей с площадью 100×100 м^2, расположенной над участком рудного тела. Электрический ток в петле создавался генератором прямоугольной формы, задающий сигнал которого поступал с GPS-приемника. Частота электрического тока 0,5 Гц создавалась делением на два сигнала 1 pps (1 импульс в секунду) при помощи триггера. Амплитуда электрического тока в петле – 20 А. Измерения вертикальной составляющей магнитной индукции осуществлялись магнитомодуляционным преобразователем, имеющим плоскую амплитудно-частотную характеристику в диапазоне частот до 1 кГц. Синхронизация генератора и приемника осуществлялась GPS-приемниками LS20031. Выходной сигнал магнитомодуляционного преобразователя поступал на первый вход АЦП AD7734, а на второй вход АЦП поступал опорный сигнал со второго GPS-приемника. Оцифрованные сигналы записывались на портативный компьютер. Продолжительность измерения в каждой точке – 20 периодов сигнала.

Измерения проводились на площади внутри токовой петли. Так как над месторождением проходит высоковольтная линия электропередач, то в области измерений наблюдалась внешняя помеха с частотой 50 Гц, из-за чего не во всех точках измерения обеспечивалось необходимое отношение сигнала к шуму. Основное рудное тело месторождения находится на глубине от 120 до 200 метров от земной поверхности. Внутри контура токовой петли, расположенной над круто падающем участком рудного тела, в

нескольких точках измерения был зарегистрирован фазовый сдвиг около -0,2° на частоте возбуждения 0,5 Гц. Основная погрешность измерений при этом была порядка ±0,01°.

Графики зависимости фазового сдвига по двум профилям внутри токовой петли, расположенных в 40 метрах друг от друга, представлен на рисунке 2. На этих зависимостях показан абсолютный фазовый сдвиг φ°, полученный из измеренного сдвига фазы вычитанием сдвига фаз, вызванного индуктивностью токовой петли на частоте 0,5 Гц и задержкой сигнала в каналах АЦП, которые в сумме составляют -0,17º.

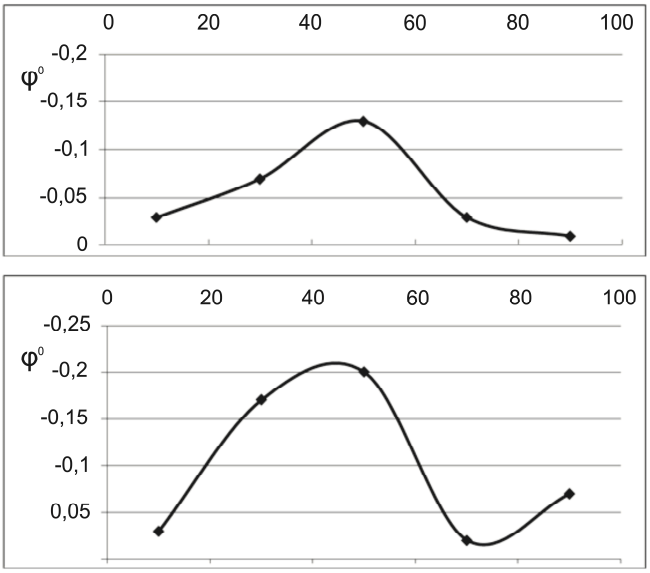


Рис. 2. Зависимость фазового сдвига по двум профилям внутри токовой петли. По горизонтальной оси отложено расстояние вдоль профиля (в метрах).

Особенности фазового метода и его возможности Применение в фазовом методе накопления достаточно большого числа полных периодов измеряемого сигнала, выбор оптимальной частоты возбуждения, а также программная обработка результатов измерений при помощи дискретного преобразования Фурье, позволяют получить погрешность определения фазового угла в диапазоне частот 0,5 Гц – 80 Гц на уровне ±(0,005÷0,01) градуса при отношении принимаемого сигнала магнитного поля к внешнему шуму ~40 дБ. Это позволяет применить данный фазовый метод измерения не только инженерной геофизике для нахождения подземных проводников, но и в индукционной электроразведке для выявления малоконтрастных электромагнитных аномалий, связанных с рудыми месторождениями.

Литература

1. Жильников В.Д., Куликов А.В., Шемякин Е.А., Лемец В.И. Электроразведка методом вызванной поляризации при электрических промышленных помехах. // Разведка и охрана недр. М., «Недра», 1974, № 6, с.53-56.

УДК 550.348.098.64(571.56+571.65)

СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИЕ РАЗЛОМЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОЙ ОРОГЕННОЙ ОБЛАСТИ

Г.А. Стогний, В.В. Стогний*, stogny@newmail.ru, stogny_vv@mail.ru*
Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия

Аннотация. Верхояно-Колымская орогенная область (ВКОО) является одним из сейсмоактивных регионов России. В этом регионе было зарегистрировано более 20 тысяч землетрясений. Очаги землетрясений ВКОО распределены по всему интервалу земной коры (4–40 км), при этом наиболее сейсмоактивными являются её верхний и средний слои. В проблеме создания сейсмотектонической модели земной коры ВКОО лучше всего изучены активные разломы осадочного комплекса, однако роль элементов структуры кристаллического фундамента практически не исследована.

SEISMOACTIVE BASEMENT FAULTS OF THE VERKHOYANSK-KOLYMA OROGENIC REGION

G.A. Stogny, V.V. Stogny*, stogny@newmail.ru, stogny_vv@mail.ru*
Kuban State University, Krasnodar, Russia

Abstract. Verkhoyansk-Kolima orogenic region (VKOR), which located in the North-Eastern part of the Russia, is marked by a high seismic activity. At this region more than 20 thousand earthquakes are registered. The centers of the earthquakes are placed in the whole interval of the Earth's crust (4–40 km), in spite of most seismic activity is in the middle and upper her layers. In the problem of creation the seismotectonic model of the VKOR Earth's crust the active faults of the sedimentary complex are best of all studied, at the same time the role of the structure elements of crystal basement practically is not investigated.

Верхояно-Колымская орогенная область (ВКОО) представляет собой один из наиболее сейсмоактивных регионов Северо-Востока России. Землетрясения ВКОО, акватории морей Лаптевых и Охотского Б.М. Козьмин [1] объединил в Лаптевско-Колымский сейсмический пояс, в последующем название которого изменилось на сейсмическую зону хр. Черского Арктико-Азиатского сейсмического пояса [2], разделенной на два сегмента: северо-западный (Яно-Индигирский) и юго-восточный (Индигиро-Колымский).

Характер распределения эпицентров землетрясений ВКОО по отношению к тектоническим нарушениям осадочного чехла исследован довольно детально [2−5], однако связь землетрясений большой интенсивности ($M > 5$) со структурными элементами кристаллического фундамента, к которому фактически и приурочены гипоцентры ряда крупных землетрясений, практически не исследована.

Кристаллический фундамент ВКОО перекрыт верхнепротерозой-мезозойскими карбонатно-терригенными отложениями мощностью более 10 км и обнажён в южной части на Охотском срединном массиве, а за его пределами на Анабарском и Алдано-Становом щитах Сибирской платформы. В качестве базовой принята модель блоковой делимости консолидированной земной коры (рис. 1), обоснованная по результатам комплексной интерпретации гравитационного и магнитного полей на уровне аномальных областей и зон с учётом петрофизических критериев структурно-вещественных комплексов (рифей-палеозойского карбонатного и палеозой-мезозойского верхоянского терригенного). Тектоническая структура кристаллического фундамента ВКОО включает восточные фланги Алдано-Станового и Анабарского геоблоков и Верхоянский геоблок. С востока и юга Верхоянский геоблок граничит с Приморским, Колымо-Омолонским и Охотоморским геоблоками. Верхоянский, Алдано-Становой и Анабарский геоблоки принадлежат к крупной тектонической единице – Северо-Азиатскому кратону, ограниченному с востока Восточноверхоянской, а с юга – Охотоморской сутурами. В рамках Северо-Азиатского

кратона ВКОО сформирована за счёт складчатых деформаций осадочного слоя его восточной пассивной окраины [6]. Приморский и Колымо-Омолонский геоблоки относятся к консолидированной земной коре Колымо-Омолонского микроконтинента. Граница между Северо-Азиатским кратоном и Колымо-Омолонским микроконтинентом рядом авторов [3, 6, 7] отождествляется с зоной взаимодействия Евразиатской и Североамериканской литосферных плит.

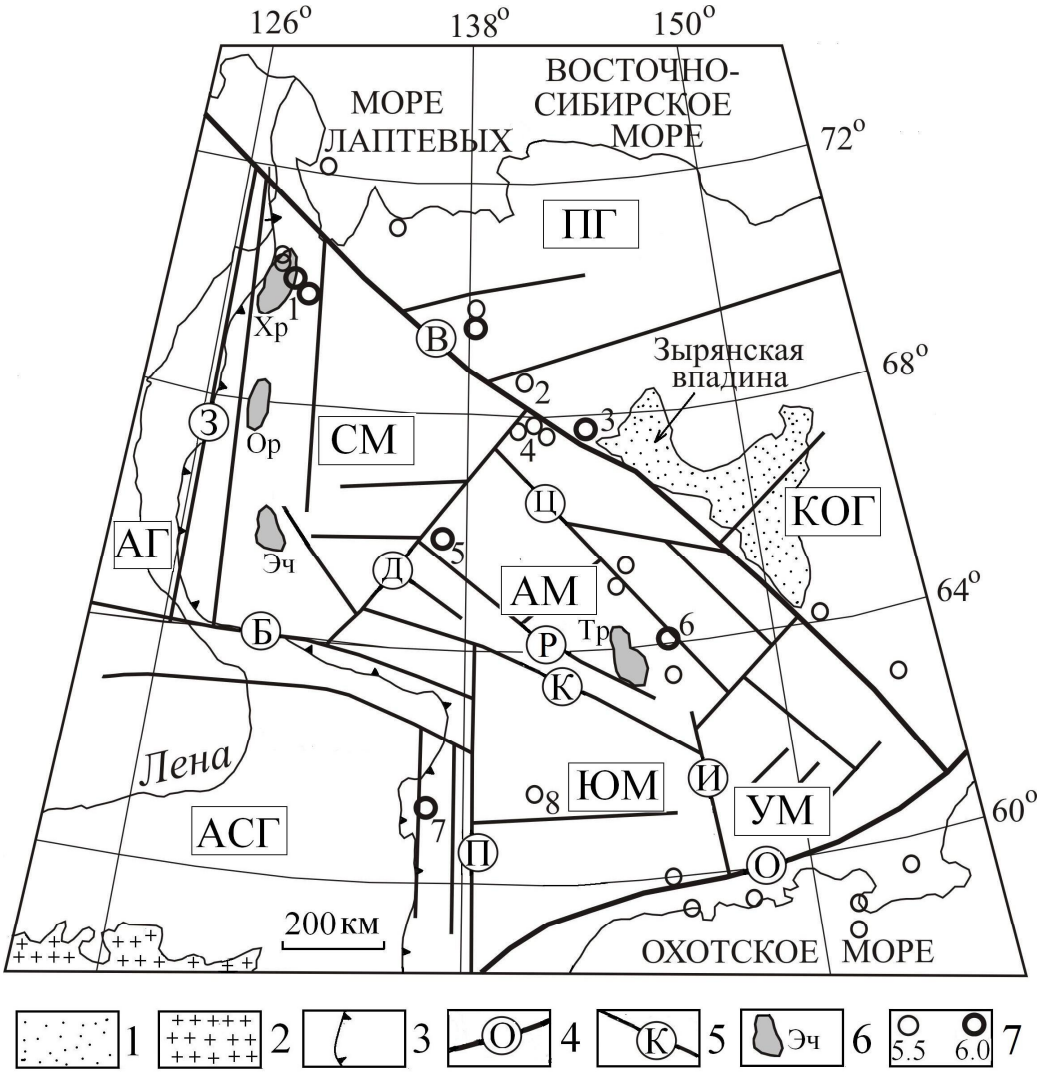


Рис. 1. Схема тектонического строения кристаллического фундамента ВКОО и распределение эпицентров сильных землетрясений

1 – осадочные мел-неогеновые отложения Зырянской впадины; 2 – выходы раннедокембрийских пород Алдано-Станового щита; 3 – граница Сибирской платформы с Верхояно-Колымской орогенной областью; 4 – глубинные ограничения Северо-Азиатского кратона: В – Восточноверхоянская, О – Охотоморская сутуры; 5 – межгеоблоковые и блоковые разломы: Б – Байкало-Вилюйский; З – Западноверхоянский, П – Присеттедабанский; К – Кебеменский, Д – Дербекенский, И – Инский, Р – Верхнеиндигирский, Ц – Центральный; 6 – гранитогнейсовые купола Верхоянского геоблока кристаллического фундамента: Хр – Хараулахский, Ор – Орулганский, Эч – Эчийский, Тр – Тарынский; 7 – эпицентры землетрясений с магнитудой более 5,5 и более 6,5 (шкала Рихтера) по [3, 4, 7]: 1 – Булунские (1927-1928 гг., М = 6,8), 2 – Уяндинское (22.11.1984., М = 5,6), 3 – Абыйское (14.02.2013 г., М = 6,9), 4 – Андрей-Тасское (22.06.2008 г., М = 6,1), 5 – Адычанское (02.12.1951 г., М = 6,4), 6 – Артыкское (18.05.1971 г., М = 6.6–6.8), 7 – Сетте-Дабанское (14.04.1951 г., М = 6,5), 8 – Юдомское (30.09.1971 г., М = 5,5). Геоблоки кристаллического фундамента: АСГ – Алдано-Становой, АГ – Анабарский, КОГ – Колымо-Омолонский, ПГ – Приморский. Мегаблоки Верхоянского геоблока: СМ – Северо-Верхоянский, ЮМ – Южно-Верхоянский, АМ – Адыча-Нерский, УМ – Аян-Уряхский

Очаги землетрясений ВКОО распределены по всему интервалу земной коры (4–40 км), при этом наиболее сейсмоактивными являются её верхний и средний слои. Исходя из предложенной модели глубинного строения ВКОО, рассмотрена роль разломов кристаллического фундамента в закономерностях размещения сильных (M > 5,5) землетрясений (рис. 1).

В пределах Северо-Верхоянского мегаблока эпицентры крупных землетрясений (Булунские, Тит-Арынское, Быковское) приурочены к Хараулахскому гранитогнейсовому куполу, а глубина их гипоцентров находится в интервале 15–25 км [6]. Эпицентры землетрясений тяготеют к Хараулахскому хребту субдолготного простирания, в южной части которого в 1927–1928 гг. произошло 5 сильных Булунских землетрясений с M = 5,8–6,8.

Максимальное количество сильных землетрясений ВКОО зафиксировано на территории Адыча-Нерского мегаблока. Тектонические нарушения Адыча-Нерского мегаблока имеют северо-западное простирание, аналогичное Восточноверхоянской сутуре, разграничивающей Северо-Азиатский кратон и Колымо-Омолонский микроконтинент. Это позволяет предположить формирование структуры Адыча-Нерского мегаблока в условиях мезозойской коллизии Северо-Азиатского кратона и Колымо-Омолонского микроконтинента. Процесс взаимодействия последних, по-видимому, продолжается и в настоящее время, что вызывает формирование в земной коре полей тектонических напряжений и их разрядку посредством землетрясений.

В пределах Адыча-Нерского мегаблока в зоне Центрального разлома произошло одно из самых крупных на Северо-Востоке России Артыкское землетрясение (18.05.1971 г., M = 6,6–6,8). Глубина афтершоков Артыкского землетрясения соответствует интервалу 4–25 км при максимальной плотности их распределения на глубине 10–18 км, а интенсивность подземного толчка в эпицентре составляла 9 баллов [6]. Другое крупное землетрясение, Адычанское (02.12.1951 г., M = 6,4), расположено в зоне влияния Дербекенского и Верхнеиндигирского разломов западной части Адыча-Нерского мегаблока.

Наиболее сейсмоопасной начала настоящего века является центральная часть зоны Восточноверхоянской сутуры. Так, в области сочленения Восточноверхоянской сутуры и Дербекенского разлома зарегистрирована серия землетрясений с M > 5, самое сильное среди которых – Андрей-Тасское (22.06.2008 г., M = 6,1). Андрей-Тасское землетрясение интенсивностью до 8 баллов приурочено к одноимённому кряжу, глубина его очага равна 18 км [7].

Восточнее Андрей-Тасского землетрясения в зоне влияния Восточноверхоянской сутуры в пределах Колымо-Омолонского геоблока следует отметить Уяндинское (22.11.1984 г., M = 5,6) и Абыйское (14.02.2013 г., M = 6,9) землетрясения. Глубина очага Абыйского землетрясения 14 км, а интенсивность до 8 баллов [7]. Согласно [4] Андрей-Тасское и Уяндинское землетрясения имеют одинаковую ориентацию изосейст, большая ось которых направлена в близширотном направлении. По этому параметру они отличаются от других землетрясений сейсмической зоны хр. Черского, изосейсты которых имеют форму эллипса, вытянутого в северо-западном направлении.

В пределах Аян-Уряхского мегаблока юго-восточной части ВКОО зафиксированы главным образом землетрясения с M = 4,0–5,5. Юдомское землетрясение (30.09.1971 г., M = 5,5) центральной части Южно-Верхоянского мегаблока по-видимому контролировалось субширотным разломом.

Таким образом, очаги крупных (M > 5) землетрясений контролируются структурными элементами кристаллического фундамента ВКОО, в частности, подчинены его блоковой структуре и межблоковым разломам. К наиболее активно сейсмогенерирующим тектоническим нарушениям консолидированной земной коры ВКОО следует отнести Восточноверхоянскую сутуру, разграничивающую Верхоянский и Колымо-Омолонский геоблоки, и Центральный разлом Адыча-Нерского мегаблока.

Наиболее сейсмоактивной в настоящее время является центральная часть зоны Восточноверхоянской сутуры. В зоне её влияния в пределах Адыча-Нерского мегаблока зарегистрирована серия землетрясений с M > 5 (Андрей-Тасское, Абыйское).

Литература

1. Козьмин Б.М. Сейсмические пояса Якутии и механизмы очагов их землетрясений. М.: Наука, 1984. 127 с.
2. Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С. Динамика сейсмогенных структур Индигиро-Колымского (Охотского) сегмента зоны хр.Черского // Отечественная геология. 2012. № 5. С. 55–61.
3. Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С. Сейсмотектоника северо-восточного сегмента зоны хр.Черского // Отечественная геология. 2009. № 5. С. 94–100.
4. Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С. Динамика очаговых зон сильных землетрясений северо-восточного фланга Момо-Селенняхских впадин // Отечественная геология. 2011. № 5. С. 113–119.
5. Стогний Г.А., Стогний В.В., Строение литосферы Верхояно-Колымской орогенной области // Отечественная геология. 2000. № 5. С. 41-44.
6. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК “Наука/интерпериодика”, 2001. 571 с.
7. Шибаев С.В., Петров А.Ф., Маккей К.Д., Козьмин Б.М., Петрунин С.В., Пересыпкин Д.М., Старкова Н.Н., Тимиршин К.В. Сильное Абыйское землетрясение 2013 года на границе Евразиатской и Североамериканской литосферных плит на Северо-Востоке Якутии // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Якутск: СВФУ. 2014. С. 58.

УДК 550.837+552.08:53(3)

ЭЛЕКТРОГРАВИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЛИТОСФЕРЫ СЕВЕРНОГО УРАЛА

***О.В. Сурина, А.Г. Дьяконова, В.С. Вишнев**, sur2004@inbox.ru*
Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. На примере Серовского геотраверса (Северный Урал) реализуется принцип построения электрогравитационной модели строения земной коры на основе результатов геоэлектрики с привлечением гравитационных данных. Полученные данные позволят дополнить, а в ряде случаях уточнить имеющуюся геолого-геофизическую информацию о составе и строении земной коры Северного Урала.

ELECTRO-GRAVITATIONAL MODEL OF THE UPPER PART OF LITHOSPHERE OF THE NORTHERN URALS

***O.V. Surina, A.G. Dyakonova, V.S. Vishnev**, sur2004@inbox.ru*
Institute of Geophysics of the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The principle of electro-gravitational model construction using electromagnetic (EM) and gravity data is realized by the example of the Serovsky geotraverse (Northern Urals). The obtained data will allow adding, and in a row cases to specify the available geological-geophysical information on composition and structure of Earth's crust of the Northern Urals.

Основу для разработки электрогравитационной модели составил экспериментальный материал, полученный сотрудниками лаборатории электрометрии Института геофизики УрО РАН методами геоэлектрики (ИЭМЗ-АМТЗ-МТЗ-ГМТЗ) с апостериорной проверкой ранее полученных результатов [1] и сгущением сети наблюдений. Внедрение в практику работ широкополосной цифровой аппаратуры "Метроникс" (Германия) и "Феникс" (Канада) позволило нам получить полную информацию об электрических параметрах разреза в диапазоне глубин от первых метров до сотен километров [2].

В данной работе рассматриваются результаты электромагнитных исследований, выполненных по Серовскому геотраверсу протяженностью порядка 500 км, пересекающему все основные тектонические структуры I порядка в северном сечении Урала с выходом на восточную часть Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и западную часть Западно-Сибирской платформы (ЗСП). В результате обработки и интерпретации электромагнитных данных по исследуемому пересечению построен геоэлектрический разрез верхней части литосферы до глубины 50 км (рис. 1).

Основные особенности геоэлектрической модели заключаются в следующем:

– земная кора характеризуется глыбово-блоковым строением: участки высокоомных пород перемежаются с ослабленными зонами пониженного сопротивления;

– геологические границы первого порядка выделяются разломами различной ориентации до глубин порядка 10 и более километров;

– граница между ВЕП и Предуральским краевым прогибом выделяется флексурообразным уступом, возникшем в результате опусканий окраины платформы по глубинному разлому. В п. 62 наблюдается его связь с астеносферным проводником;

– наклонные разломы восточного падения четко фиксируют надвиговую природу западного склона Урала (VI, VII на рис. 1, *в*) в диапазоне глубин 4-10 км и фрагментарно сопровождаются кливажом с участками повышенной электропроводности вплоть до Восточно-Уральского поднятия (IX). Это свидетельствует о наложенном характере палеозойских отложений на древний, возможно рифейский фундамент ВЕП;

– Серовско-Маукский глубинный разлом маркирует границу Восточно-Уральского блока, представляющего собой "гранитную ось" Урала. Граница между Восточно-Уральским

поднятием (IX) прогибом (X) проведена условно, поскольку гнейсо-магматические комплексы здесь перекрыты мезокайнозойским чехлом осадочных отложений ЗСП.

Помимо структурно-тектонических особенностей земной коры Северного Урала в геоэлектрическом разрезе достаточно уверено прослеживается расслоенность осадочного чехла ВЕП и ЗСП по электрическим параметрам.

Сравнение результатов геоэлектрики с особенностями распределения гравитационного поля указывает на наличие четкой пространственной связи, что отражается в графиках суммарной продольной проводимости коры (рис. 1).

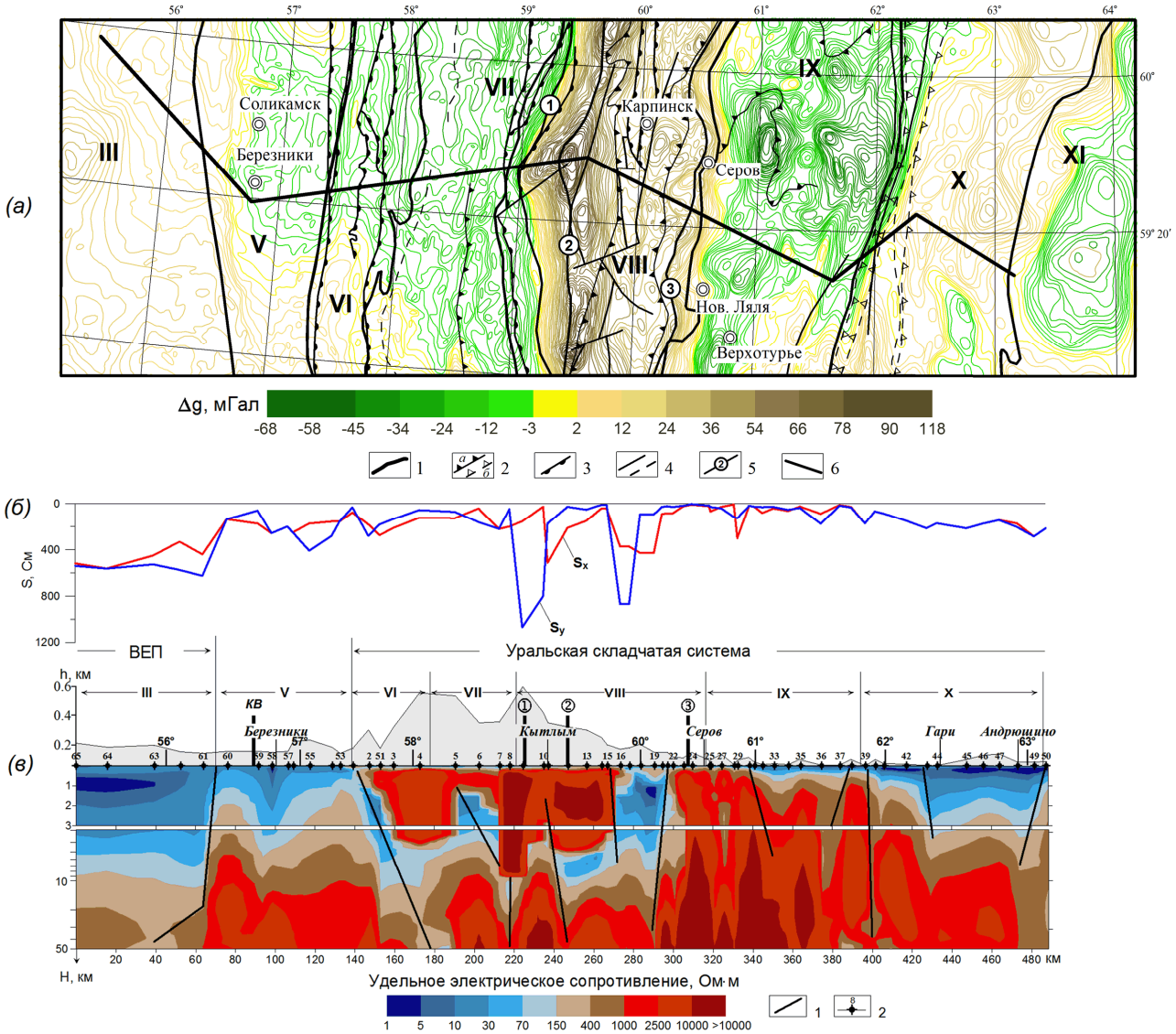


Рис. 1. Результаты электромагнитных исследований по Серовскому профилю

(*а*) – характер гравитационного поля с элементами структурно-тектонического районирования [3]: 1 – границы структур I порядка: III – восточная окраина Восточно-Европейской платформы, V – Предуральский краевой прогиб, VI – Западно-Уральская зона складчатости, VII – Центрально-Уральское поднятие, VIII – Тагильская мегазона, IX – Восточно-Уральское поднятие, X – Восточно-Уральский прогиб, XI – Зауральское поднятие; 2 – разрывные нарушения сбросового характера: *а* - достоверные, *б* – предполагаемые; 3 – надвиги по данным ВСЕГЕИ (2002 г.); 4 – тектонические нарушения достоверные и предполагаемые; 5 – осевые линии зон глубинных разломов, фиксированные интрузиями: ① - Салатимский, ② - Платиноносный, ③ - Серовско-Маукский; 6 – профиль наблюдений; (*б*) – суммарная продольная проводимость литосферы для меридионального (S_x) и широтного (S_y) направлений; (*в*) – геоэлектрический разрез верхней части земной коры (метод ИЭМЗ-АМТЗ-МТЗ). 1 – тектонические нарушения по данным геоэлектрики; 2 – пункты наблюдений

В рамках данной работы исследованы преимущественно плотностные и электрические характеристики интрузивных, эффузивно-осадочных и эффузивных, метаморфических и осадочных образований и их зависимости от пористости.

Физические свойства горных пород являются основным связующим параметром, необходимым для наиболее обоснованной интерпретации геофизических полей. От этого зависят наши представления о геологическом строении объекта исследований, как при поисково-разведочных, так и региональных работах.

Изучением физических свойств на Урале в течение многих лет занимался большой коллектив исследователей: Е.М. Ананьева, М.В. Карманова, Е.Б. Горонович, Т.А. Пестрецова, Ю.Н. Горбачев, В.С. Зонов, С.В. Шебухова, В.С. Дружинин, Н.А. Плохих и многие другие. Привлекались опубликованные работы, включая монографические издания под ред. М.Л. Озерской и Н.В. Подобы, Н.А. Туезовой, Н.Б. Дортман, В.Н. Копрановой, В.А. Дедеева, И.В. Запорожцевой и др. с акцентом на доступную авторам информацию о приуральской части ВЕП и ЗСП.

Плотность является одной из наиболее значимых физических характеристик, поскольку позволяет охарактеризовать структурно-вещественный состав горных пород, их метасоматические изменения, определить пористость и природу гравитационных аномалий. Однако, вне зависимости от петрографических разностей, характерен широкий диапазон изменения плотности, обусловленный различными процессами, протекающими в земной коре (метаморфизм, условия образования и залегания горных пород, температура, давление и т.д.). Перекрытие средних значений этого параметра существенно затрудняет идентификацию пород по плотности и требует привлечения дополнительной информации по данным других геофизических методов.

Удельное электрическое сопротивление, которое наряду с вещественным составом пород характеризует реологические свойства среды. В верхних горизонтах разреза электропроводность горных пород обусловлена в основном движением ионов в поровой воде (свободной и связанной), которая отличается значительно более низким удельным электрическим сопротивлением, чем минеральный скелет большинства горных пород, следовательно, степень пористости, трещиноватости и проницаемости среды, заполненной влагой, является преобладающим фактором, оказывающим влияние на изменение электрического сопротивления горных пород. Пониженными значениями удельного сопротивления обладают сильно пористые, трещиноватые и обводненные породы (осадочные, тектонически разрушенные изверженные и метаморфические породы с сопротивлением до сотен Ом·м), которые выделяются на фоне массивных изверженных (граниты, сиениты, диориты, диабазы, базальты, порфириты, габбро и др.) и некоторых осадочных (известняки, мраморы, кварциты) пород, сопротивление которых колеблется от 1000 до 7000 Ом·м, а иногда и в больших пределах (до 10^4 и более Ом·м для ультраосновных пород).

В результате проведенных исследований проанализированы сведения об удельном электрическом сопротивлении, плотности и пористости магматических, метаморфических и осадочных пород Урала и прилегающих к нему платформенных областей, а также исследованы зависимости между этими физическими параметрами. Полученные данные показывают, что пористость водонасыщенных горных пород однозначно отражается на величине удельного сопротивления, даже у пород с уплотненными текстурами (интрузивные, метаморфические, палеотипные эффузивы, метадиагенезированные осадочные отложения) и на плотности для пород с пористыми текстурами (осадочные образования, кайнотипные эффузивы). Пористость менее 4 % практически не отражается на величине плотности изверженных пород, из чего следует, что изучение такого параметра горных пород, как удельное электрическое сопротивление, позволяет получать обоснованное представление о нарушенности и проницаемости среды, особенностях структурно-тектонического и геологического строения земных недр [4].

На основании выявленной эмпирической зависимости удельного электрического сопротивления и плотности пород от пористости обосновывается разработанный авторами методический подход к построению согласованных электрогравитационных моделей [5, 6]. Согласно разработанной ранее методике моделирования распределения плотности верхней части земной коры в блоках, выделенных по электромагнитным данным, с помощью модулей программных средств, интегрированных в GIS ArcView, выполнена интерпретация поля силы тяжести в двумерном варианте (рис. 2). В качестве экспериментального поля использована аномалия Буге масштаба 1:1000000. Геологические образования в модели рассматриваются, как совокупность полигональных объектов произвольного сечения с неограниченным числом вершин, каждый из которых наделен постоянной плотностью и намагниченностью. Это дает возможность получать в цифровом виде координаты всех вершин и с помощью математического блока рассчитывать модельные кривые. Расчетный блок программы основан на формулах для комплексного логарифмического потенциала притяжения и формулах Пуассона-Этвеша для составляющих магнитной индукции. Используя функции ввода и редактирования данных системы ArcView, отклонения модельной кривой от экспериментальной минимизируются за счет положения и угла наклона изменяемых контактов, коррекции значений избыточной плотности и введения предполагаемых глубинных объектов по геолого-геофизическим данным. В процессе интерпретации был осуществлен подбор кривой поля силы тяжести (сплошная линия на рис. 2, *а* – практическая кривая, пунктир – расчетная кривая поля силы тяжести).

Особенностью выполнения расчетов гравитационной модели являлась соразмерность линейных масштабов в горизонтальном и вертикальном направлениях, поэтому пришлось трансформировать глубинный разрез по данным магнитотеллурики (построение которого предусматривало логарифмический вертикальный масштаб) в линейный. Однако, детали расслоенности осадочных образований в верхних частях разреза, более четко проявленные в геоэлектрическом разрезе, были учтены при построении согласованной электрогравитационной модели.

Значения плотности и удельного электрического сопротивления в представленной электрогравитационной модели согласуются с оценками данных физических параметров по результатам электроразведочных работ методами постоянного тока (ВЭЗ, БКЗ и каротажа скважин) и петрофизическим исследованиям на образцах горных пород (таб. 1). В целом, электрогравитационная модель носит обобщающую пространственную характеристику рассматриваемой территории, поскольку пункты зондирования местами располагаются на значительном удалении от профиля и могут отражать детали различной литологии горных пород.

Анализ полученных результатов позволяет проследить следующие особенности:

– пассивная окраина ВЕП (пп.61÷65) с мощностью терригенно-карбонатного комплекса осадочных отложений порядка 6-8 км, плотность пород здесь варьирует от 2,25 до 2,65 г/см^3. В приуральской части ВЕП выявлена авлакогенная зона на глубине 8-20 км, в центре которой наблюдается мантийный диапир и прослеживается его связь и астеносферным проводником;

– Предуральский краевой прогиб (V на рис. 1) выделяется как самостоятельный структурный блок. Западная граница с ВЕП фиксируется флексурообразным разломом. Прогиб заполнен терригенными осадками верхнего палеозоя и отчасти триаса с переменной мощностью от 4 до 6 км;

– на восточной границе Предуральского прогиба и Западно-Уральской зоны складчатости выделяется крупный надвиг (Яйвинский) восточного падения. Западно-Уральская мегазона (VI) вмещает преимущественно палеозойские шельфовые комплексы;

– Центрально-Уральская мегазона (VII), сложена главным образом метаморфизованными осадочными докембрийскими (?) и раннепалеозойскими толщами, слагающими осевую, наиболее приподнятую часть Уральских гор;

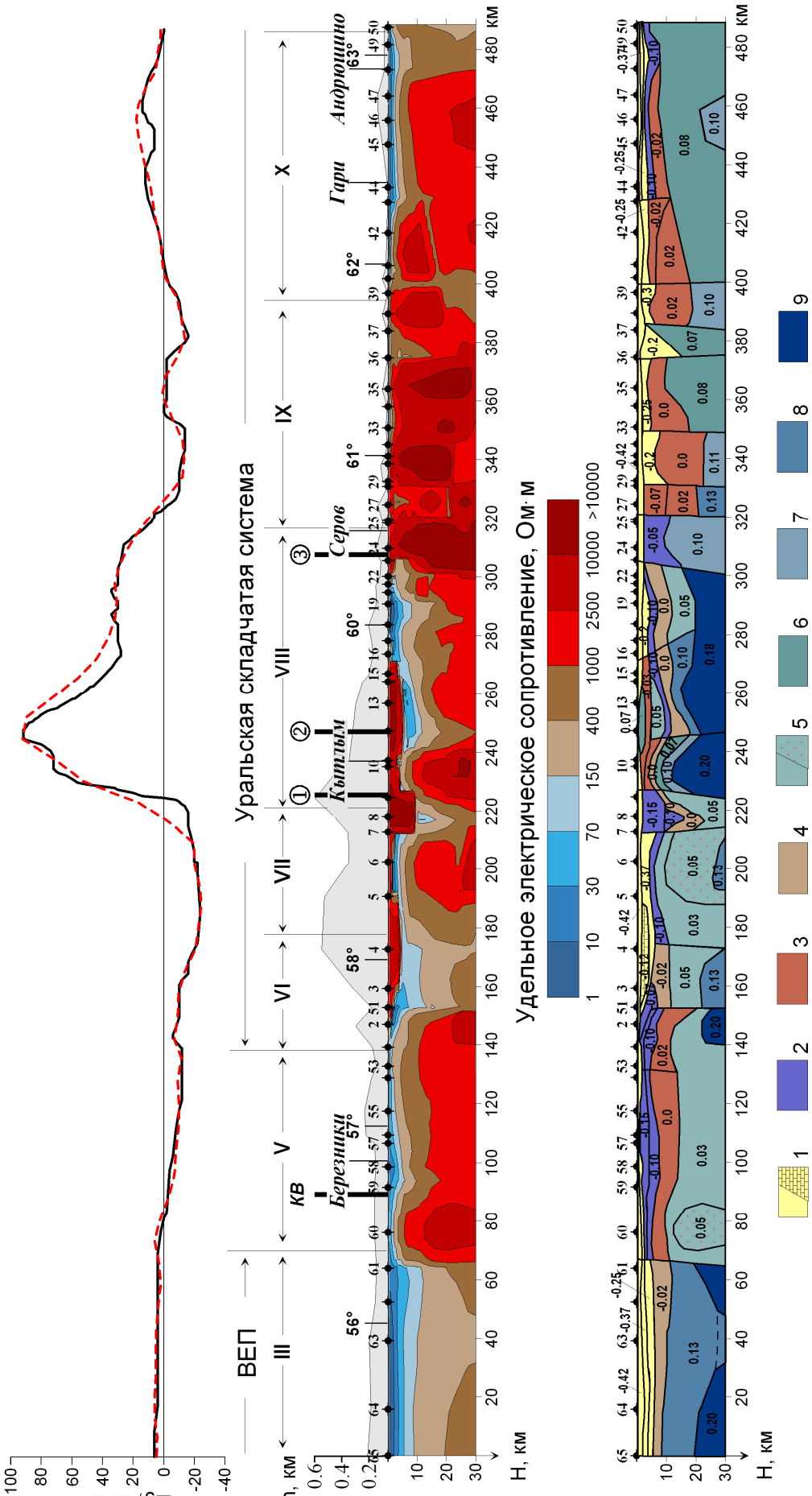


Рис. 2. Результаты 2D интерпретации

(1 - осадочный чехол (пески, глины, мергели, опоки, терригенно-карбонатные комплексы); 2 - флиши моласса, серпентиниты, андезиты, базальты, риолиты; 3 - граниты, плагиограниты, гранито-гнейсы; 4 - углисто-глинистые сланцы, филлитизированные глинистые сланцы; 5 - кварциты, кварцито-песчаники, кварцевые порфиры и метаморфические сланцы, включения гранитоидов; 6 - андезито-базальтовые, базальтовые порфириты их туфы, туфопесчаники, туфобрекчии; 7 - долериты, габбро-долериты, кварцевые диориты, гранито-гнейсы диорит-плагиогранитного ряда; 8 - гранулито-базитовые комплексы; 9 - диабазы, габбро амфиболизированное, габбро-диабазы, габбро-нориты, амфиболиты

Таблица 1. Вещественный состав пород и средние значения плотностей по результатам моделирования

Геологические комплексы	**Избыток (дефицит) плотности по результатам моделирования Δσ, г/см^3**	**$\bar{\sigma}$*, г/см^3**
Осадочный чехол: пески, глины, мергели, опоки	-0,42÷-0,25	2,32
терригенно-карбонатные комплексы	-0,25÷-0,12	2,52
Флиши моласса, серпентиниты, андезиты, базальты, риолиты	-0,15÷-0,05	2,56
Граниты, плагиограниты, гранито-гнейсы	-0,07÷-0,02	2,62
Углисто-глинистые сланцы, филлитизированные глинистые, углисто-кремнистые сланцы	-0,05÷0,02	2,66
Кварциты, кварцито-песчаники, кварцевые порфиры и метаморфические сланцы, включения гранитоидов	0,03÷0,05	2,71
Андезито-базальтовые, базальтовые порфириты их туфы, туфопесчаники, туфобрекчии	0,07÷0,08	2,75
Долериты, габбро-долериты, кварцевые диориты, гранито-гнейсы диорит-плагиогранитного ряда	0,10÷0,11	2,79
Гранулито-базитовые комплексы	0,13	2,80
Диабазы, габбро амфиболизированное, габбро-диабазы, габбро-нориты, амфиболиты	0,18÷0,20	2,85÷2,87

**Плотность определена исходя из средней плотности пород до кровли консолидированного фундамента 2,67 г/см^3.*

– в пределах осевой структуры Урала (VIII), в западной ее части, прослеживаются глубинные “корни” Салатимского разлома (ГУГР) и платиноносного пояса, представленного в данном сечении Кытлымским дунит-клинопироксен габбровым массивом со средней плотностью 2,74 г/см^3, нижняя кромка которого выражена в модели очень четко на глубине 3-4 км. Особое внимание заслуживает обнаруженная нами зона аномально высокой проводимости в районе 60°с.ш., где по геологическим данным установлена нарушенность коры уже вблизи земной поверхности. К ней приурочен целый набор известных месторождений полезных ископаемых рудной и нерудной спецификации. Так, на восточном контакте рифовых известняков в районе г. Карпинска (п.18) располагается мощный триасовый угленосный грабен. Другой особенностью является пространственная связь зоны с целой цепочкой скарно-магнито-титановых месторождений и рудопроявлений Серовско-Невьянского пояса. Далее на восток по профилю в пределах задернованной территории обнаружены серпентиниты (пп. 23, 24) со средней плотностью 2,62 г/см^3, образующие Серовский серпентинитовый массив с выходом на земную поверхность. Этот массив приурочен к одному из наиболее крупных и хорошо выраженных разломов Урала – Серовско-Маукскому. По данным электромагнитных исследований наблюдается западное падение этого разлома, что находится в соответствии с геологическими и сейсмическими данными. На глубине свыше 20 км в Тагильской зоне выделяется меланократовый фундамент с плотностью 2,85-2,87 г/см^3, что согласуется с представлениями С.Н. Иванова и др. [7];

– зона сочленения Урала и Западно-Сибирской платформы (п.п. 25÷50). Территория перекрыта чехлом рыхлых мезокайнозойских осадков. Поскольку информации о приповерхностной геологии здесь несоизмеримо меньше, чем о западных зонах Урала, тем большую ценность здесь приобретают данные электромагнитных зондирований. В п.31 нами выделено тектоническое нарушение, приуроченное к западному контакту Салдинского метаморфического комплекса. Согласно электрогравитационной модели в пределах

Восточно-Уральского поднятия верхняя граница консолидированного фундамента залегает первые сотни метров от земной поверхности. К восточной границе Восточно-Уральского поднятия (п. 39) приурочен региональный разлом-сброс восточного падения. Он прослеживается на всех геологических картах на достаточно большие расстояния. В пределах Восточно-Уральского прогиба располагается палеозойская Пелымская структурно-формационная зона, сложенная преимущественно вулканогенными и вулканогенно-осадочными толщами девона и карбона, в составе которой выделяется Даниловский грабен (до глубин 3-4 км), где преобладают раннетриасовые кайнотипные базальты и риолиты с плотностью 2,57-2,65 г/см^3 [8]. По данным геоэлектрики западный борт грабена прослеживается между п.п. 43÷44, падающим на восток разломом, а восточный между п.п. 48÷50 четким сбросом западного падения.

В данной работе представлен новый подход к интерпретации результатов комплексных геофизических исследований. С этой целью привлекались материалы двух независимых методов: геоэлектрики и гравиметрии, и на основании анализа эмпирической зависимости физических параметров удельного электрического сопротивления, плотности и пористости горных пород, обосновывается переход к петрофизической и структурно-тектонической трактовке полученных результатов.

Таким образом, получены ценные сведения о расслоенности и обоснованные оценки вещественного состава горных пород верхних частей коры Урала и прилегающих к нему частей ВЕП и ЗСП до глубин порядка 30 км. Дальнейшие исследования будут направлены на применение данного подхода при разработке комплексной геофизической модели строения земной коры и верхней мантии с привлечением данных геотермии.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН № 7 (№ 12-Т-5-1020) и гранта РФФИ № 14-05-31213.

Литература

1. Дьяконова А.Г., Иванов К.С., Астафьев П.Ф., Вишнев В.С., Коноплин А.Д. Геоэлектрический разрез литосферы Северного Урала // Физика Земли. 2007. № 4. С. 15-20.
2. Дьяконова А.Г., Сурина О.В., Вишнев В.С., Коноплин А.Д., Астафьев П.Ф. Геоэлектрическое строение литосферы Северного Урала. Материалы VI Всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2013 [Электронное издание] / Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. - Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. Режим доступа: http://ems2013.ipgg.sbras.ru, свободный.
3. Тектоническая карта Урала (домезозойский складчатый фундамент) м-ба 1:1000000 / Ред. И. Д. Соболев. ПГО “Уралгеология”. - Свердловск, 1983.
4. Сурина О.В., Дьяконова А.Г., Редозубов А.А. Корреляция физических параметров при построении электрогравитационной модели на примере Среднего Зауралья // Известия вузов. Горный журнал. 2012. № 7. С. 94-101. ISSN 0536-1028.
5. Сурина О.В. Согласованные электрогравитационные модели строения земной коры по трем субширотным геотраверсам Среднего Зауралья // XIII Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник докладов. - Екатеринбург: ИГф УрО РАН, 2012. С. 200-203.
6. Сурина О.В. Дьяконова А.Г. Принцип построения электрогравитационных моделей на основе электромагнитных данных // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 5. С. 163-170. ISSN 0536-1028.
7. Иванов С.Н., Ефимов А.А., Минкин Л.М. и др. Природа Уральской геосинклинали // Доклады Академии наук СССР. 1972. Т. 206. № 5. С. 1177-1180.
8. Иванов К.С., Коротеев В.А., Федоров Ю.Н. и др. Строение зоны сочленения Приполярного Урала и Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна //Литосфера. 2004. №2. С.108-124.

УДК 551.12+551.14+551.16+553.3+553.982

СИЛАНОВАЯ НЕФТЬ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ЗЕМЛИ

Д.Н. Тимофеев, *timofeev.dmitriyy@rambler.ru*
**ООО фирма "Космическая Технология" г. Железногорск. Россия.*

Аннотация
Предлагается новая концепция наличия в глубинах Земли подвижного вещества, основа которого смесь различных соединения кремния с водородом - силанов (аналогов углеводородов) которому даётся название «силановая нефть». Показывается, что силановая нефть образуется путём экстракции ряда элементов Si, Al, Fe из геосфер мантии газами, исходящими при разрушении пород теплом ядра Земли. Дано объяснение происхождению корней материков и деплетированной мантии под океанами. Показано, что землетрясения в зоне Заварицкого, Беньофа происходят по причине взрывов здесь скоплений силановой нефти. Такая локализация взрывов объяснена концентрацией силановой нефти в зоне Заварицкого, Беньофа по причине малой проницаемости пород континентальной мантии и более высокой проницаемости пород в зонах перехода континентальной мантии в океаническую. Здесь происходит быстрое поднятие силановой нефти и переход её в нестабильное состояние.

SILANE OIL AND GLOBAL PROCESSES OF TRANSFORMATION OF THE EARTH

D.N. Timofeev, *timofeev.dmitriyy@rambler.ru*
**Firm "Space Technology" Zheleznogorsk. Russia.*

Abstract
Proposes a new concept of presence in the depths of the Earth rolling of the substance, the basis of which a mixture of different compounds of silicon with hydrogen - silane (analogs of hydrocarbons) which is given the name "silane oil." It is shown that silane oil is formed by extraction of a number of elements Si, Al, Fe from Geosphere mantle gases emanating during the destruction of the rocks warm the Earth's core. An explanation of the origin of the roots of continents and depleted mantle beneath the oceans. It is shown that the earthquake in the area Zavaritsky, Benioff are caused by explosions here the clusters silonovoy oil. Such localization of explosions explained by the concentration of these substances in the area of Zavaritsky, Benioff due to the low permeability of the rocks of the continental mantle and a higher permeability of rocks in the transition zones of the continental mantle in oceanic, where there is a fast rise and, consequently, the transition silonovoy oil in an unstable state.

Со времён скопления Земли из вещества газопылевого облака, структура её в значительной степени преобразовалась. Соединения элементов большой плотности погрузились в центр планеты и образовали ядро Земли. Их температура поднялась из-за радиационного разогрева. Прошел распад соединений и их сепарация по слоям элементов [1]. Соединения элементов с меньшей плотностью остались выше, в мантии. Породы мантии также, в определённой степени, сепарировались на геосферы по плотности рисунок 1 поз 10, которая имеет корреляцию с плотностями составляющих их атомов [2]. Толщина этих геосфер мантии рассчитана, исходя из состава элементов Земли [3] и показана на рисунке 1. В мантии осталась определённая часть соединений тяжелых элементов в виде примесей к основным породам. Ядро, после распада соединений, полностью очистилось от лёгких элементов. Элементы с плотностью атомов меньше чем у цинка всплыли из ядра Земли с образованием грандиозных массивов деплетированной породы океанической мантии, из чистых химических соединений. Эти всплывшие массы были обнаружены по аномалиям скоростей [4] рисунок 1 поз 1, что отличает их от, имеющих примеси, коренных пород мантии поз.2

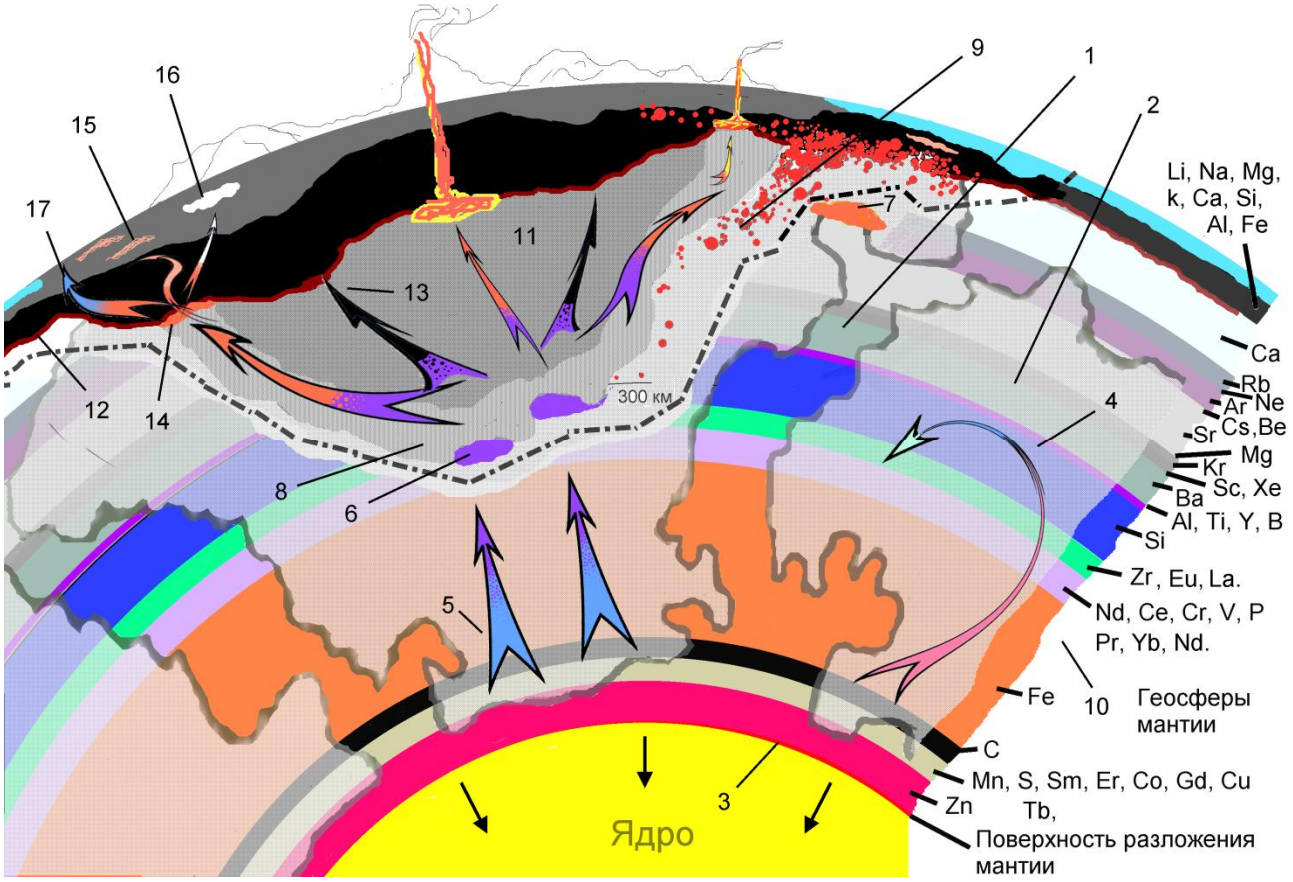


Рисунок 1. Основные процессы в мантии Земли (выделенное линией -·-·- увеличено). 1- массивы всплывшего очищенного вещества из ядра Земли; 2 – коренные породы мантии; 3 - зона распада вещества мантии; 4 – внутренние перемещения в мантии; 5 – поднятие газов из зоны распада; 6 – скопление силановой нефти (астеносфера); 7 – скопление силановой нефти под океанами; 8 – корень континента; 9 – проекции фокусов землетрясений 1965-1968гг , петропавловском секторе Камчатки на плоскость перпендикулярную камчатскому желобу, по С.А. Федотову с сотрудниками [5] ; 10 – геосферы мантии; 11 – континентальный вулкан с лавой из соединений кальция; 12 – зона синтеза базальта; 13 – местное утолщение коры Земли; 14 – скопление нитронефти; 15 – залеж углеводородов; 16 – залеж карбонатов; 17 – выход воды, азота, углекислого газа.

Соединения с наименьшей плотностью и высокой подвижностью поднялись на поверхность образовав атмосферу, океаны и кору Земли состава – O 49.8%, Si 26.9%, Al 7.2%, Fe 3.87%, Ca 3.7%, K 2.1%, Na 2%, Mg 1.7%, C 0.77%, H 0.7%, Cl 0.24%, S 0,14%, N 0.002% остальные 0.251%. Натрий, калий, кальций, магний имеют наименьшую плотность атомов и их достаточно высокие концентрации в коре Земли естественны. Высокое содержание алюминия, железа и кремния объясняется их свойствами образовывать лёгкие подвижные соединения в условиях мантии.

Кремний является ближайшим родственником углерода, и образует аналогичные ему соединения. Аналог метана CH_4, газ силан SiH_4 температура кипения -111.8 ^oC. (у метана температура кипения -164^oC). Как у метана, у силана есть ряд гомологов Si_2H_6, Si_3H_8, Si_4H_{10}, Si_5H_{12}, Si_6H_{14}… Он образует и непредельные соединения. Смесь их можно сравнить с нефтью. Назовём это подвижное вещество на основе кремния «Силановой нефтью»

Предлагается новая концепция образования коры Земли океанов и атмосферы в результате реакций разложения силановой нефти и химического взаимодействия её элементов с элементами лёгких пород верхней мантии Na, K, Ca, Mg. На поверхности эти процессы наблюдаются в виде вулканических проявлений, но большей частью они проходят в коре Земли и верхней мантии.

В глубинах Земли углерод может находиться в стабильном состоянии метана, что диктуется его термодинамическими характеристиками. По этим же законам кремний в глубинах Земли должен находиться в состоянии силана. Сравнительные изобарные потенциалы соединений углерода и кремния показаны на рисунке 2.

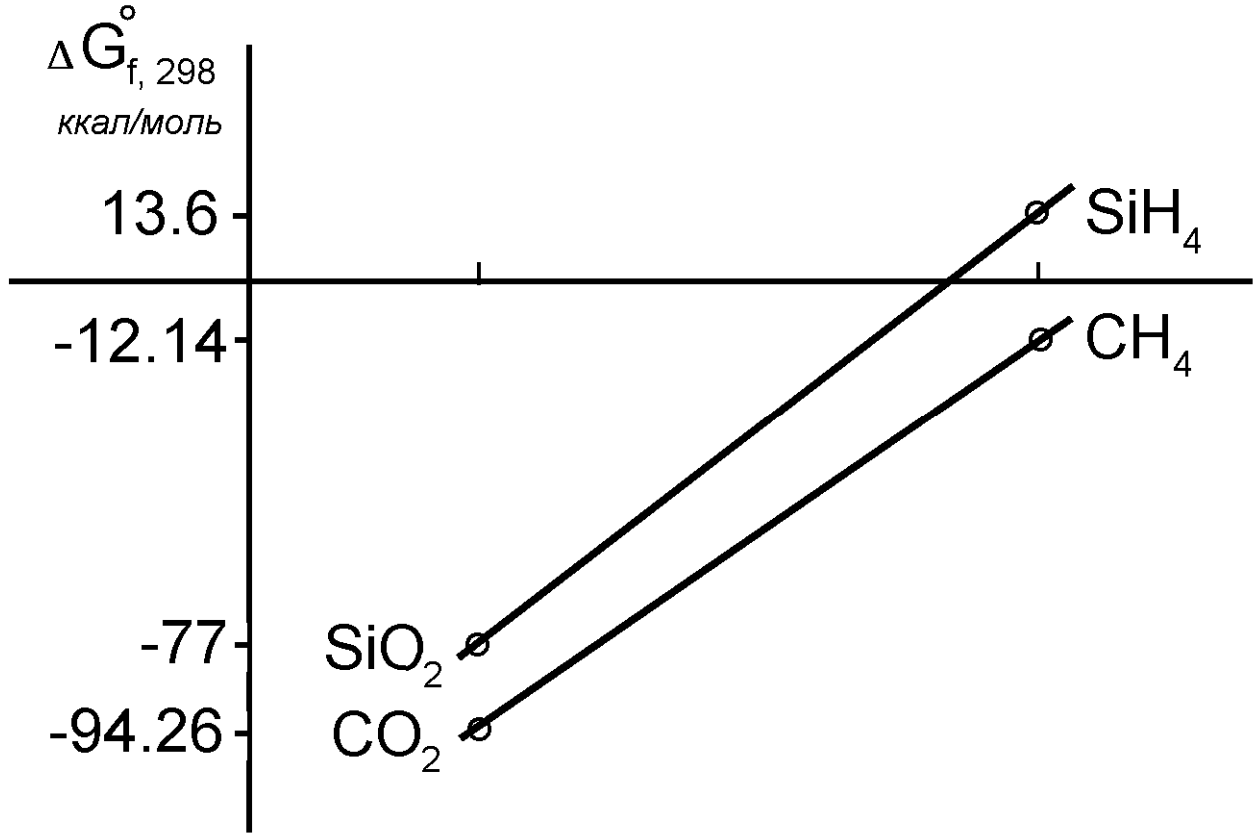


Рисунок 2. Сравнительные изобарные потенциалы соединений углерода и кремния.

Большое положительное значение изобарного потенциала силана однозначно показывает на нахождение кремния в состоянии гидридов в мантии Земли, где температура высокая. На поверхности Земли силаны находиться не могут, поскольку самовозгораются или взрываются в контакте с атмосферой, а также реагируют с водой, что отличает их от углеводородов, которые разлагаются медленно. В результате воздействия тепловой энергии ядра, вещество нижней поверхности мантии разлагается. Тяжелые элементы погружаются и становятся составной частью ядра, а более лёгкие молекулы кислорода, водорода, азота, хлора, серы, фтора и др. поднимаются в мантию поз. 5 рисунка 1. Часть поднимающегося потока элементов перемещается в мантии поз.4, часть поднимается к поверхности, пополняет атмосферу, океаны и кору Земли. Проходя через мантию, газы взаимодействуют с элементами её геосфер, создавая подвижные соединения кремния, алюминия, железа, углерода и ряда других, образуя силановую нефть, в состав которой в небольшом количестве входят компоненты нитронефти [6]. Алюминий и железо могут взаимодействовать с поднимающимися веществами в геосферах мантии Земли с образованием подвижных соединений гидридов или металлокремнеорганических соединений, например трисилиналюминия, и попадать в состав силановой нефти. Всего за историю Земли силановой нефти к коре поднялось $26{,}89 \cdot 10^{21}$кг., а в среднем за год поднимается $6 \cdot 10^{12}$кг.
Средний условный состав силановой нефти за историю Земли показан в таблице 5.
Количество силановой нефти поднявшейся и образовавшей силикатную кору Земли примерно на два порядка больше чем количество нитронефти, из которой образовались в коре соединения углерода. Под континентами, поднимаясь в верхнюю мантию массы силановой нефти образуют на глубине 300-350 км скопления, которые обнаруживаются как включения с пониженными сейсмическими скоростями (астеносфера) поз 6 . Под океанами

такие скопления силановой нефти, менее энергетически насыщенной, могут находиться на меньшей глубине примерно 150 км. поз 7. Поднимаясь, силановая нефть распадается из-за снижения давления и температуры. Взаимодействуя с кислородом, силановая нефть образует SiO_2, воду, а также другие соединения, создавая в местах более интенсивного и продолжительного поднятия менее проницаемые породы - корни континентов [7] поз 8 .

Таблица 5

Химическое соединение	Масса /10^{21}кг	Массовые %
O_3	13,6	50,57
Si_nH_{2n+2}	9,22	34,28
AlH_3, ($Al(SiH_3)_3$)	2,17	8.07
FeH_3, ($Fe(SiH_3)_3$)	1,16	4,31
C_2H_2, CN, C_2N_2	0,25	0,93
Cl_2O_7,	0,18	0,67
HS	0,042	0,16
NO_2	0,022	0,08
Соединения V, Ni, Mo, Pb, Ag, Zn, Cr, Th, U, Mn, и т.д.	0,25	0,93

Меньшая проницаемость пород корней мешает силановой нефти подняться под континентами (кроме рифтовых зон) ближе к коре Земли. Это приводит к стеканию её к краям континентов и поднятию наклонно вдоль склона в зонах Заварицкого – Беньофа [8], где проницаемость пород выше. При быстром подъёме по крутому склону силановая нефть не успевает спокойно трансформироваться на стабильные на новом уровне соединения. В некоторых местах происходят скопления силановой нефти из нестабильных соединений, её взрывы, которые дают в этих зонах большое количество землетрясений поз 9. В результате расходования кремния и выпадения SiO_2 при окислении силана, в оставшейся подвижной фазе увеличивается процентное содержание соединений углерода, в остатке получается нитронефть, имеющая большое содержание нитрованных углеводородов и некоторое количество остаточных силанов [2].

По схеме фокусов землетрясений С.А. Федотова с сотрудниками видно, что на Камчатке нитронефть распространяется так же по коллектору, как в сторону океана, так и в сторону суши. Взрывы её вызывают здесь землетрясения. На суше выходы нитронефти создают дугу вулканических проявлений [9]. Разложение нитронефти и силановой нефти происходит с выделением значительной энергии, что приводит к разогреву до высокой температуры окружающих пород из лёгких элементов Na, K, Ca, Mg. Породы лёгких элементов взаимодействуют с соединениями нитронефти и силановой нефти с образованием, при быстром разложении, расплавленных силикатных пород (магмы), например по реакции

$$7Si_3H_8+24O_2+Na_2O+2AlH_3 \rightarrow Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2+ SiO_2+ 31H_2O$$

В ходе реакций образуется так же вода, CO, CO_2, N_2 которые при расширении в горячих пространствах магматических очагов вызывают землетрясения или, при прорыве на поверхность, вулканические проявления. При малом содержании в нитронефти силана, получается жидкая базальтовая лава основного состава с содержанием SiO_2 возможно менее 50%. При высоком содержании силана получается вязкая лава с содержанием SiO_2 до 60-70%. При многолетних извержениях от распада силана образуется дополнительное количество SiO_2 и его концентрация в лаве может увеличиваться. Так в лаве вулкана Парикутин в Мексике за 9 лет с 1943 до 1952г. концентрация SiO_2 увеличилась с 55% до 60%. В зоне континентальных рифтов вулканы, например Ньирагонго в Африке могут иметь магматический очаг на большой глубине, в геосфере мантии состоящей из соединений кальция. По этой причине получается магма из карбоната кальция, окиси кальция около 35% и только 20% SiO_2 поз 11. Это показывает наличие геосферы из пород на основе кальция под корой Земли. На всей нижней поверхности коры Земли происходит медленное разложение силановой нефти. Силановая нефть просачивается из мантии к коре Земли, где медленно окончательно разлагается. Элементы силановой нефти при медленном взаимодействии с

элементами соединений верхней мантии Na, K, Ca, Mg и др. образуют базальт, а так же руды, нитронефть и воду поз 12. Это приводит к росту толщины коры Земли со скоростью 1 мм за 100 лет. В прежние эпохи, когда содержание кремния в мантии было больше, концентрация кремния в силановой нефти была выше и в зоне разложения силановой нефти синтезировались гранитные породы, имеющие в своём составе больше SiO_2.. Поднятие силановой нефти происходило на разных участках с разной интенсивностью. В местах более интенсивных поднятий силановой нефти базальтовый слой нарастал быстрее и кора Земли толще поз.13 (Гималаи, Тибет, Саяны, Урал). Здесь, поскольку порода коры Земли имеет меньше плотность, чем подстилающие геосферы, более толстая кора Земли из-за сил гидростатического выталкивания имела значительные нагружающие напряжения, что привело к её множественному разрушению (процессу горообразования). Также горообразованию способствовали поднятия коры скоплениями силановой нефти и её взрывы. При разложении силановой нефти, сопровождающимся образованием силикатных пород, оставшаяся небольшая часть подвижной фракции, нитронефть накапливается в виде залежей на глубинах, примерно 5-30 км. поз 14. Нитронефть может со временем ближе просачиваться к поверхности Земли и разлагаться, образуя залежи углеводородов поз 15. Кроме углеводородов при разложении нитронефти образуются карбонаты поз 16, азот, вода, углекислый газ поз.17 и рудные залежи. Учитывая, что за время существования Земли на поверхность поднялось примерно $0{,}25 \cdot 10^{21}$кг углерода, количество нитронефти поднимающейся из глубины к коре Земли за год составляет около 55 миллионов тонн. Чтобы определить, какая часть из этой нитронефти превращается в углеводороды, а сколько разлагается в глубинах Земли, необходимы дополнительные расчеты. Также требует изучения вопрос количества запасов нитронефти и силановой нефти в глубинах Земли.

Литература

1. Тимофеев Д.Н. Структура ядра Земли и происходящие в нём процессы. Глубинная нефть 2 №4 2014.с. 542-567. http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-2-4-2014/3_Timofeyev_2-4-2014.pdf
2. Тимофеев Д.Н. Структура мантии Земли и синтез углеводородов в свете теории химических процессов. Электронный журнал "Глубинная нефть". Том 2. №9. 2014. с.1455-1469. http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-2-9-2014/6_Timofeev_2-9-2014.pdf
3. Тимофеев Д.Н. Концепция состава Земли в свете законов ядерной физики и химии Глубинная нефть 1-№12- 2013.с. 1908-1921. http://journal.deepoil.ru/index.php/2012-04-04-03-42-06/2013/1-12
4. Bijwaard H., Spakman W., Engdahl E.R. Closing the gap between regional and global travel time tomography//J. Geoph.Res. 1998, V. 103.P.30055-30078.
5. Глава 6: эволюция земной коры http://geoman.ru/books/item/f00/s00/z0000016/st008.shtml
6. Тимофеев Д.Н. Структура Земли и генерация углеводородов в свете законов ядерной физики, химии и химической термодинамики. Глубинная нефть http://journal.deepoil.ru/index.php/2012-04-04-03-42-06/2013/tom1-4 1-№4- 2013.с. 421-435.
7. Павленкова Н.И. Ротационно – флюидная модель глобального тектогенеза. Дегазация земли и генезис нефтегазовых месторождений. ГЕОС., М. 2011
8. Заварицкий А.Н. Вулканическая зона Курильских островов//Вестн.АН СССР.-1946.-№ 1.-С.41-48. http://www.igem.ru/biblio/ujboley_vist/zavaritsky_vist.htm
9. Тимофеев Д.Н. Энергия вулканов и землетрясений в свете законов химии, ядерной физики и термодинамики, а также возможность предотвращения вулканических проявлений и землетрясений. V Всероссийский симпозиум по вулканологии и палеовулканологии. Вулканизм и геодинамика. ИГГ УрО РАН Екатеринбург 2011.с.449-452. http://deepoil.ru/index.php/bazaznaniy/item/54-тимофеев-дн

ГОРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ КАРТИРОВАНИЯ КАРСТОВ И РОЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПРИКЛАДНЫХ СХЕМАХ ПОЛЕВОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ И СКВАЖИННЫХ МЕТОДОВ: РЕЗИСТИВИМЕТРИИ И ТЕРМОМЕТРИИ

А.В. Тимохин, Ю.В. Лаптев, В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев
ukrigd15@mail.ru, Институт Горного Дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. В работе даны примеры геометризации карстопроявлений для решения задач капитального строительства. Горно-геометрические и геологические факторы влияют на методическую последовательность: измерений, интерпретации и регистрация, как карстов, так и сплошных (безопасных) массивов. Но, в полезном «сигнале» геометризации ключевой вклад «вносит» изменение за счет полых пространств естественного режима фильтрации при разнообразии и постоянстве во времени проницаемости вмещающих пород. Фактический материал позволяет наглядно оценить особенности и прикладные схемы картирования.

MOUNTAIN-GEOMETRICAL PROBLEM OF MAPPING KARSTS AND THE ROLE OF THE HYDRODYNAMIC MODEL APPLIED IN THE SCHEMES OF FIELD SURVEY AND BOREHOLE METHODS: RESISTIVIMETRY AND THERMOMETRY

A.V. Timokhin, Ju.V. Laptev, V.D. Kantemirov, R.S. Titov, A.M. Yakovlev
ukrigd15@mail.ru, IME OF UB of RAS – Institute of Mining of Ural Branch of Russian Academy of Science, Ekaterinburg, Russia

A summary of the report. The work gives examples of the mapping of the karst to solve problems of capital construction. Mining-geometrical and geological factors influence the methodological sequence: measurements, interpretation and registration as karsts and solid (nonhazardous) areas. But, in the useful "signal" geometrization key contribution "makes" change due to the hollow spaces of the natural filtering mode variety and consistency over time the permeability of the host rocks. The actual material allows for visual assessment of features and applied measurement circuit.

Практика геометризации. Линейная (латеральная) и глубинная регистрация карстов реализуется за счет сочетания вертикальных электро-зондирований ВЭЗ (от 2-х до 5-ти на площадь) и съемки по методике сплошного, площадного срединного градиента ПСГ (на планах разведки в полосе, «захватывающей» предполагаемые «объекты»). Оптимальные размеры расстановок электродов установлены экспериментально, измерения направлены на получение информации о распределении сопротивления в создаваемом сплошном, равномерно- глубинном (от 15- до 40м) электрическом поле.

В гг. Березовский, Каменск-Уральский техногенный карст- следствие горных работ неглубокого, приповерхностного заложения, которые велись ориентировочно с начала-середины XIX века до не позднее, чем 20-х и 30-х годов XX века. Добывалось золоторудное (жильное золото в коренных кварц-гранитоидных породах) и железорудное сырье (лимониты в осадочном массиве, приуроченном к зоне разлома: геометрически сложного сочленения песчаников и «выдавленных» порфиритовыми дайками - источник железа - на один с ними гипсометрический уровень известняков, аргиллитов, алевролитов…).

Извлекалась золоторудная масса на порядок меньше, чем лимонитов. Но, в условиях близости рудника и горных работ на глубинах 400-1500 м за счет усиления фильтрации в г. Березовский фиксируется воздух в больших сравнительных объемах.

При субвертикальном расположении пустот:

- если над выработкой не имеется породной кровли (например: на шурфе) наблюдается максимальная частота изолиний, при К намного меньшем 1, с минимальным непосредственно на шурфе (К - 0.45; 0.4 и 0.2; 0.15), наклон шурфа всегда соответствует направлению максимального градиента (максимум К - 1.2; 1.5 и 2.5; 3.0).

В г. Березовский для проектируемого коттеджа необходима дистанция от подработки, построенный – признан безопасным. На ул. Старых Большевиков фундамент возведен непосредственно на шурфе – причина разрушения частного домовладения. Застройщик не запросил данные о выработках, которые имеются в службах рудника и предоставляются по первому требованию архитектурного отдела муниципалитета. Признаков опасных выработок под фундаментом дома по ул. Ленина не выявлено.

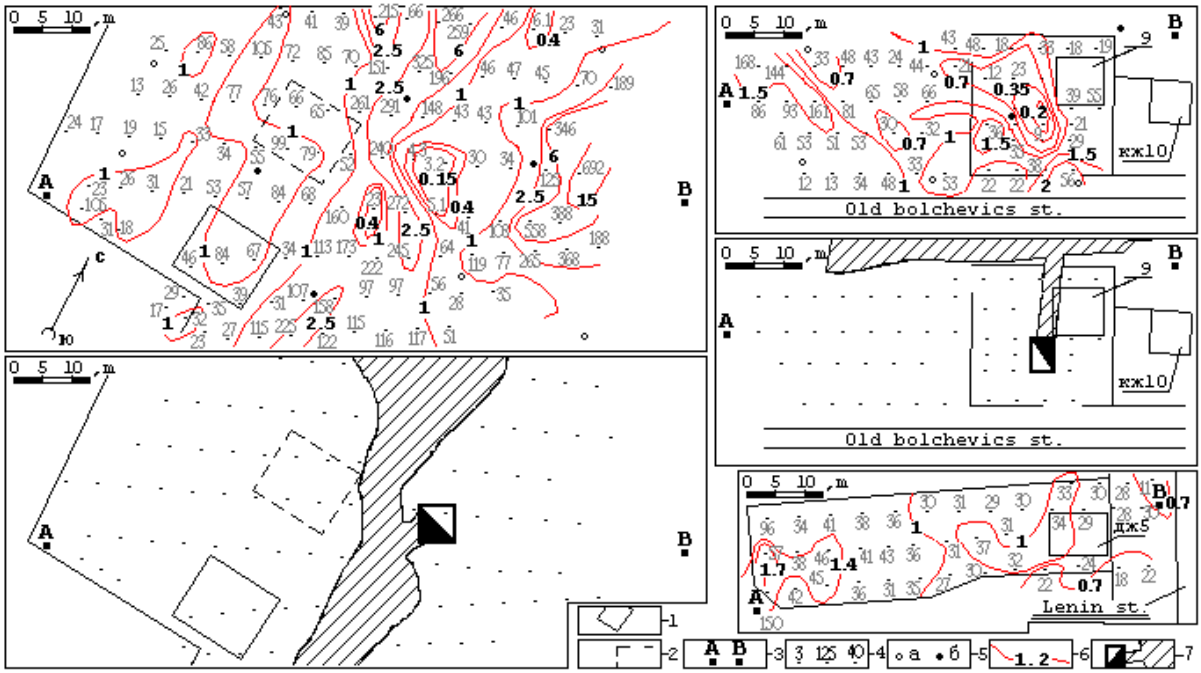


Рис. 1. Результаты измерений в г. Березовский (1993- 99 гг..).
1,2- построенные и проектируемые здания, 3,4- расположение питающих электродов и центров линий (=6м) приемных в съемках ПСГ (цифры- сопротивление ρк, Ом.м), 5- ВЭЗ без искажения выработкой (а) и с искажением (б), 6- изолинии электрической плотности К в потенциальном поле, 7- откартированный шурф и зона подработки (штриховка).

Угроза провалов связана с неверной или несвоевременной оценкой развития горных работ, развития пустот в надшахтной кровле. Для вывода о благополучном размещении фундамента на основе интерпретации карстологических рисунков достаточно показать, что до глубин 40- 80 м полого объекта сечением 1.5 х 1.5 м не имеется.

В г. Каменск-Уральский в панельном 5-этажном доме были выявлены деформации в юго-восточной ¼-й части протяженности фундамента. В целях картирования по периметру были пробурены скважины, ~ 1800 погонных метров, но документировался сплошной массив. Как показали измерения, геометрия подработки не совпала с прогнозом, исходя из гипотезы обязательной деформации несущих конструкций, в первую очередь, ближайших к «источнику». Шурф располагался на удалении. По результатам интерпретации разреза был задан сектор, в котором имелась кровля пород, достаточная для устойчивости кондуктора и безопасной проходки, т.к. бурение на шурфе не допустимо. Скважина № 9/4 вскрыла выработку в интервале от 8 до 16 м., на 25-40 % заполненную водой. Шурф (называемый «дудкой», вертикальный, круглого сечения) выявлен на территории Д.с., вблизи был разбит незатейливый огород, имелись грядки овощей, клубники. Позже говорили, что стало понятно, почему при всем усилии персонала и воспитанников (несколько поколений) не удавалось полноценно поливать растения, почему почва вскорости была опять сухой.

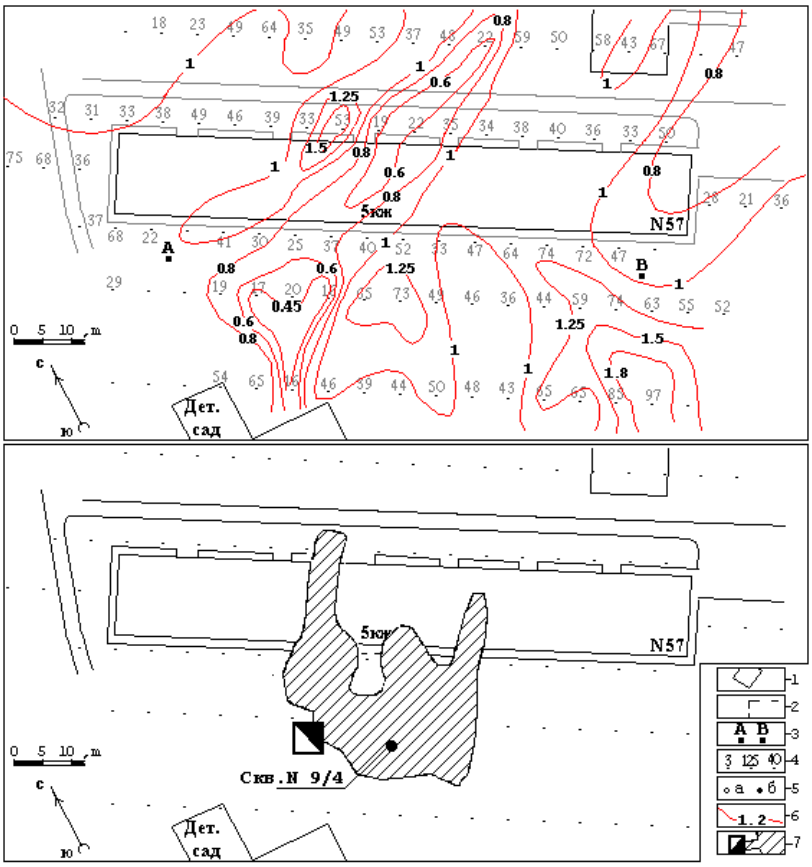


Рис. 2. Результаты измерений в г. Каменск-Уральский (1994г.).
Условные обозначения приведены на рисунке 1.

Причины деформаций и провальных явлений – участки добычи лимонитов, углей, реже, собственно карстующихся известняков. В настоящее время, горные работы не ведутся.

Картирование карстов на месторождении магнезитов выполнялось в рамках рудничной разведки. Массив сложен доломитами. Особенности обусловлены морфологией залежей: - накопление Mg структуру магнезитов уплотняет; - имеются связи объема пустот с разницей плотности доломита и магнезита, с содержанием Mg. Природа карста отличается от суффозионной [1]. Карст предложено классифицировать как «литологический» [2- 3]. Его наклонные полости имеют «каплевидную» форму, выступают смежным признаком руд в обширной области. Уверенно картируются- рисунки имеют выраженное подобие (рис. 3).

Полости не имеют выхода на поверхность, в отличие от выработки с шурфом:
- если имеется мощная кровля пород над пустотой с полувертикальным наклоном, то так же наблюдается высочайший градиент, но минимальное искажение составляет от 0.8 до 1.0; 1.2 и наблюдается в области минимальной мощности породной кровли над полостью. Наиболее глубинная часть карста характеризуется максимумом искажения К= 3 ÷ 3.8. Скважина (рис. 3, сектор К= 1.1 ÷ 1.3) вскрыла полость в интервале глубин от 23 до 28 м.

Обобщение ключевых положений модели фильтрации, как основы прикладных схем измерений. Полые, абсолютно проницаемые объекты формируют в породной, примыкающей области неоднородное векторное поле скоростей [3,4]. Изменение депрессионное (водопонижение). Ключевые положения моделирования фильтрации выполняют важную, детерминирующую роль в обосновании возможных схем измерений: 1. от параметров фильтрации → через поисковые признаки полевой электрометрии → к параметрам геометрии карстов и сплошности, 2. от параметров, измеренных при резистивиметрии и термометрии в скважинах → через расчеты по модели фильтрации → к параметрам изменения геометрии карстов и сплошности. Как показано выше – примеры реализации 1-й схемы – признаком карста выступает содержание воздуха в верхней части массива, вплоть до «осушения» не глубоких шахт. Идея 2-й схемы состоит в скважинных

наблюдениях на обводненных глубинах. Признак опасного, обрушающего развития оставленных в рудниках «полых объемов» от надшахтной кровли к поверхности - перераспределение скоростей фильтрации в глубинной, обводненной части. Регистрация динамической составляющей фильтрационного режима, возможная в 1-й измерительной схеме только при повторных наблюдениях на карстовых объектах, в скважинных: термометрии и резистивиметрии (2-я методическая схема) заложена изначально.

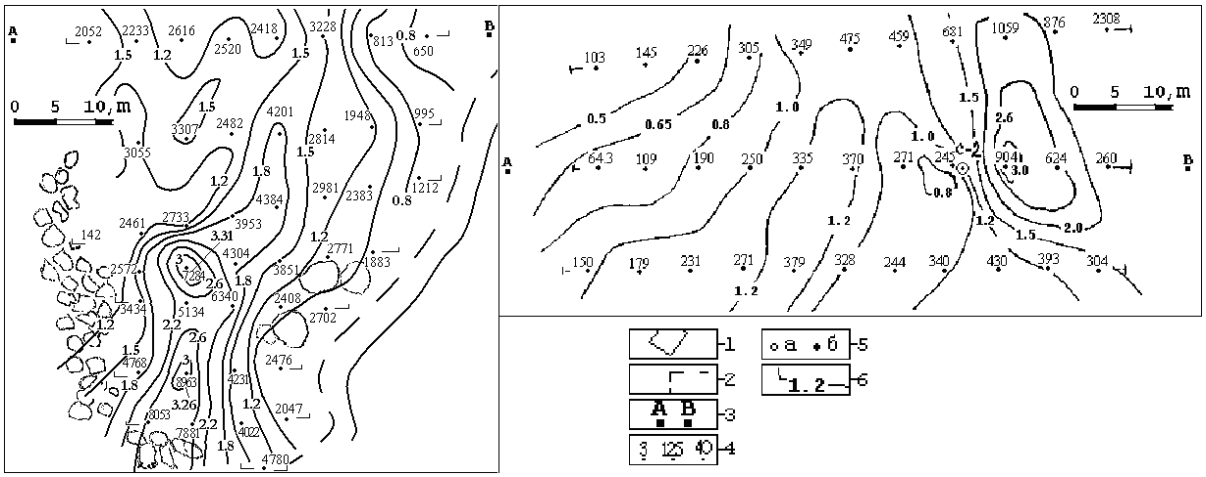


Рис. 3. Результаты измерений на месторождениях магнезитов Саткинской группы: Степной участок (2005г.), Мельнично-Паленихинский карьер (2004г.).
Условные обозначения приведены на рисунке 1.

Резистивиметрия и термометрия.

Термометрия («с» «Татнефтегеофизика») и резистивиметрия обоснованы расчетом баланса «расходуемого» в открытом (совершаемом) стволе скважины индикатора: уменьшающейся температуры воды - регистрируется температура, уменьшающейся концентрации в воде поваренной соли (NaCl) - регистрируется сопротивление воды. Для перспективных карстооценочных измерений был разработан высокоточный алгоритм расчетов (рис. 4).

В ходе модельного эксперимента- внесения погрешностей измерения сопротивления воды, концентрации соли С и времени *t* вплоть до 20%, установлено, что изучаемый алгоритм устойчив к рядовым технологическим «помехам», так как расчетная скорость изменялась в пределах ± 0.5 % [3]. Точность расчета скорости составляет не хуже 0.03 м/сутки, дебита не хуже 0.005 $м^3$/сутки, что превосходит возможности всех иных алгоритмов. При 10%-м росте скорости, постоянных угловых параметрах модели, резистивиметрия и термометрия позволяют определять геометрические изменения «карст- порода» на дистанции, превышающей размеры пустоты в 3 раза.

При изысканиях метрополитена в г. Екатеринбурге применялись резистивиметровые зонды каротажных станций, обеспечившие разведку глубин 40 ÷ 80 м. Измерения на глубинах более 150 м. сопряжено с трудностями засолки воды. При термометрии используется кратковременный прогрев паром, фиксируется температура- процесс остывания во времени. Имеется опыт применения на глубинах 400 ÷ 600 м.

Выводы. Проблема карстовой угрозы застройке и жилым микрорайонам для сырьевых регионов типична и понятна. Но повестка развития промышленности и городской среды шире- требуются инженерные решения, решениям- информация. За период 1992 - 2015 гг. на Среднем и Южном Урале авторами изучено из числа карстоопасных землеотводов (по общим оценкам от 54 до 280 тыс. га.) немногим более 600 га площадей. На территориях обеспечены картирование карстов, документирование их геометрии, меры безопасного бурения (подтверждения); на сплошных массивах, включая ранее отнесенные к подработанным (147 га) без должных оснований, так и «подозрительных» (более 200 га),

сняты запреты. Объекты построены, освоены или находятся в различных стадиях строительства. Выбор графического представления геоданных, как информационного продукта (1-я методическая схема измерений), оказался удачным- для интерпретации карстологических рисунков персоналу отделов архитектуры, застройщикам специальной подготовки не требовалось. В компетенции геофизиков оставлены – измерения, строгое соответствие полевой методике, преобразование результатов измерений в формат потенциальных распределений свойств, т.е. построение рисунков изолиний.

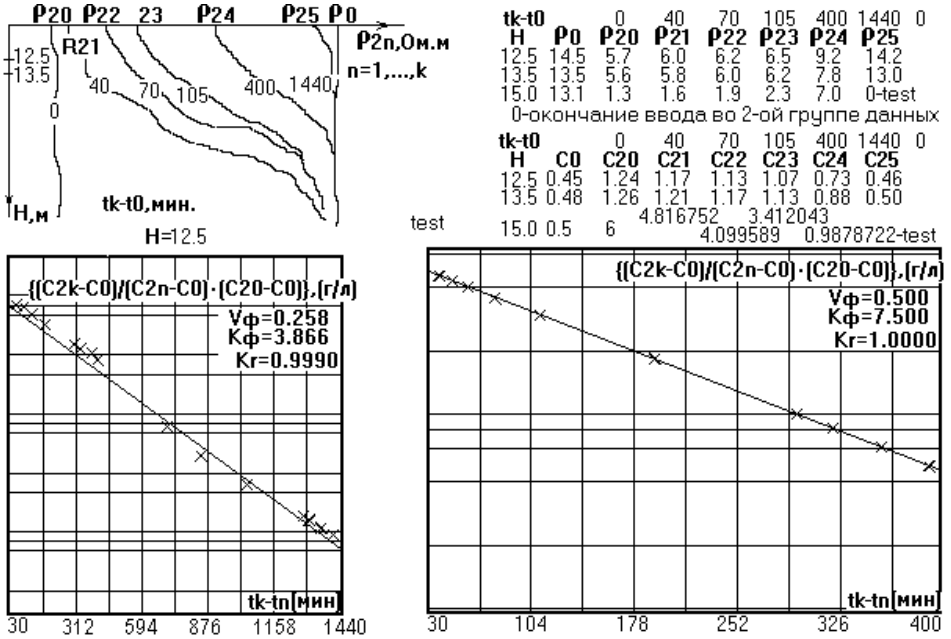


Рис. 4. Пример обработки резистивиметрии по программе GIDRA_30. Графики опреснения. Матрицы ввода сопротивлений воды ρв и расчетные концентрации соли (C, NaCl). Графики уравнения регрессии, «перехваченные» с экрана дисплея: - пример регистрации на глубине 12.5 м, - тестовый функциональный пример при скорости фильтрации Vф = 0.5 м/сут..

Список литературы.

1. Соколов Д.С. Основные условия развития карста.- М.: Госгеолтехиздат, 1962.- 322 с.
2. Решение проблемы карстологической безопасности Урала с применением измерительных средств картирования и геометризации геолого-техногенных сред / А.В. Тимохин // М.: Золотодобывающая промышленность, 2010.- № 2.- С. 26- 29,- № 3.- С. 26– 29 (продолжение),- № 4.- (окончание).
3. Тимохин А.В. Гидродинамическое поле массивов горных пород в зоне непластового (нелинейного) сочленения систем с различными фильтрационными свойствами.// Экологическая безопасность ТЭК: проблемы, пути, решения: Тез. докл. Науч.-техн. Конф./.- Пермь. 1994. С.178-181.

УДК 622.02: 537

ПЕТРОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ГЕОХИМИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ (МЕТАЛЛОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП) РУДНЫХ ПОЛЕЙ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ГЕО-ТИПАМИ MG, AL, FE- МИНЕРАЛИЗАЦИИ, ПРИ РАЗНОМАСШТАБНОЙ СЫРЬЕВОЙ ОЦЕНКЕ

А.В. Тимохин, Ю.В. Лаптев, В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев
ukrigd15@mail.ru, Институт Горного Дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. В работе дается методическое обоснование петрофизических измерений для сырьевой оценки. Раскрыта актуальность использования металлометрических диапазонов свойств. Дана единая формула изучения, измерений и внедрения в практику петрохимических сортаментов.

PETROPHYSICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS REGISTRATION (THE PRINCIPLE OF MEASUREMENT OF METALS) ORE FIELDS, REPRESENTED BY DIFFERENT GEO-TYPES OF MG, AL, FE - MINERALIZATION, WITH THE RAW SCORE FROM THE SAMPLE TO THE MOUNTAIN BLOCK

A.V. Timokhin, Ju.V. Laptev, V.D. Kantemirov, R.S. Titov, A.M. Yakovlev
ukrigd15@mail.ru, IME OF UB of RAS – Institute of Mining of Ural Branch of Russian Academy of Science, Ekaterinburg, Russia

A summary of the report. This paper presents a methodological substantiation of measurement for raw scores. It reveals the relevance of the use metallomatrichnoi ranges of properties. Given the uniform formula study and implementation in practice of petrochemical gages.

При технологической оценке рудного и нерудного, минерального сырья изучение «структурных» типов качества преобладает. Информацию о распределении сортов в горных массивах, т.е. «зональность», отображают материалы детальной разведки. При стандартных интервалах между скважинами (, начиная с сетки 200 на 200 метров, но не менее 50 на 50) она очень приблизительна с точки зрения текущего планирования. Цели эксплуатационной разведки включают уплотняющую геосъемку- интересуют свойства блоков (выемочных единиц), которые формируются в карьерах уступами фиксированной высоты 10, 15, 20 метров, так и поверочные: переработку и обогащение (от образцов до небольших объемов). Оценка сырья по данным о составе на большинстве месторождений сложна в интерпретации и чрезвычайно затратна. Анализ содержаний 1-2-х индикаторных элементов – необходима оперативность – себя не зарекомендовал. Алгоритмы перенесения данных о составе с образцов на горный массив в указанной практике решений не имеют. Актуальность петрохимических сортаментов – логика универсальных формул, исключение колоссальных ущербов от множественности толкования свойств сырья одного назначения [1, 2], ожидаемое восполнение энерго-целесообразной продукции за счет достоверной оценки обедненных георесурсов.

Петрофизические измерения способны обеспечить доступ к разномасштабной, существенной информации. Единственным, детерминирующим фактором может выступить однозначность связи: измеренное геосвойство – петрососта – характеристика обогатимости. За весь период накопления данных имеются единичные, классические примеры измерений руд, оригинально реализующие предлагаемый подход. Универсальных датчиков и измерителей минерального сырья, структур, сортов не создано, как и экспресс-регистраторов состава. Создание и развитие комплексных, разнооперативных методик, натурные эксперименты – принципы постановки задач в данной научной проблеме. Идея – изучение сырьевых Ca, Mg, Al, Fe– проявлений; анализ сигналов современных измерителей.

Петрофизическая характеристика. Сырьевые показатели (сортаменты, качество, обогатимость) месторождений, как и ресурсные свойства Недр Урала, в целом, определяют количества и сочетания окислов Ca, Mg, Al, Fe, которые вместе с SiO2 образуют составы главной, кристаллической гряды и примыкающих, терригенных пенепленов (рисунок 1).

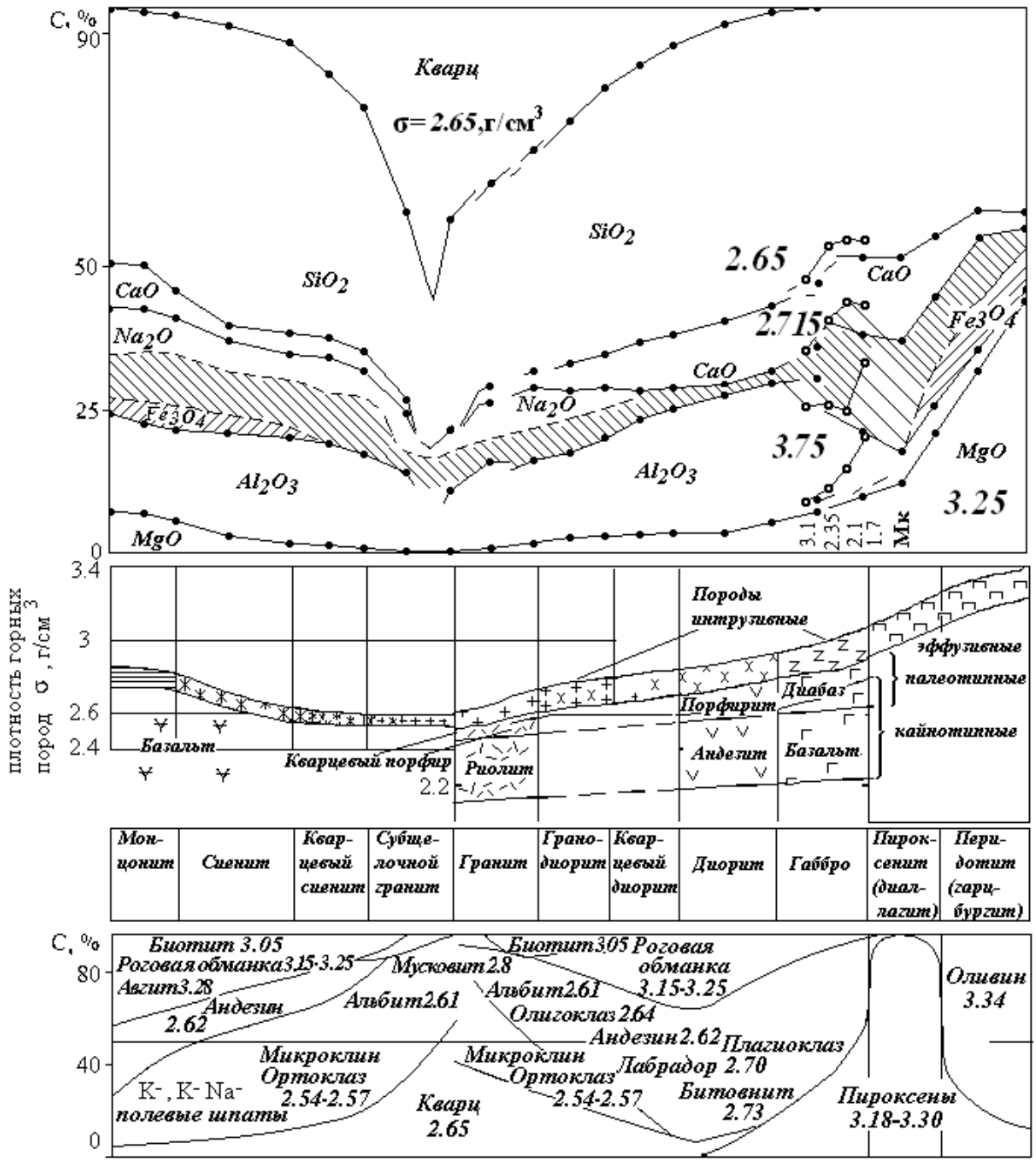


Рис. 1. Средний состав (С, %) интрузивных пород: минералов и окислов (по А.Н. Заварицкому), плотности (σ, г/см^3: цифры и график) минералов и пород (по Н.Б. Дортман). «Штриховка» - количество подчиненных окислов, преимущественно MnO, в ультраосновных породах нормального ряда; K_2O – щелочного. Мк – модуль кислотности (габбро).

Большинство металлических, железистых месторождений, как и часть нерудных, приурочены к магматическим, ультраосновным и основным массивам, генезис обусловлен магмовеществом- сохранностью, основностью, так называемой способностью сохранять высокую степень восстановления металлов (плюмовая теория поиска и разведки). Массивы Ильменского заповедника, «минералогическая кладовая Урала» характеризуются составами щелочного ряда- оси сиениты-монцониты, в сочетании с массивами щелочно-земельного, нормального ряда: ось граниты- перидотиты. Асбестовые месторождения формируются на контактах габбро-серпентиниты-перидотиты (габброидных- выбывает Al). Месторождения титаномагнетитов более сложны. Оруденения качканарского и сосновского типа развиты при сочетании габброидных контактов, так и пироксеновых (габброидно-пироксенитовые толщи – выбывает Al и Mg – рудоносные верлиты); лучшее качество отличает малая «засоренность»

жилами плагиоклазитов, отмечаемая в структуре образцов визуально [3, 4]. В терригенных залежах: магнезитов саткинской группы месторождений источником Mg выступают дайки диабазов; в бокситоносных пластах на Субровском оруденении источники Al отнесены на андезитовые, внедренные в толщи известняка структуры (теория замещения лопаритов) [5].

Изучается более строгая, «петрофизическая» общность уральских месторождений магматических и осадочных, минеральных литотипов Ca, Mg, Al, Fe- концентраций и p, T условий генезиса, петроморфно-собственных или особо идентичных. Им свойственны экстремальные вещественные замещения, обмены и абсолютные концентрации сверх-распространенных в Земной коре металлов. Обсуждается принадлежность к пограничному и на границе с диэлектриками, полупроводниковому диапазону, им свойственная. Так и составы, определяемые насыщением рудных минералов, преимущественно, окислов, и не самостоятельным, а рассеянным нахождением извлекаемых элементов. Приборы рентгено-флуоресцентного анализа (РФА), в отличие от работы на металлах и искусственных полимерах, не способны регистрировать большинство элементов атомных номеров $N < 20$, $N > 56$. Ограничения физического сигнала создает рассеяние окислов ($N < 20$), пониженная размерность, не совершаемые точки люминесценции, флуоресценции. База исследования - первично изучен, выделен и измерен ряд неординарных электронных явлений, инверсионно отмечающих Ca и Mg при любых содержаниях (2002). Приобретение – металлометрический характер диапазонов эл.сопротивления, магнитной восприимчивости, плотностей – заложено в построения физических наблюдений, регистрации распределения сортов, оригинальных примеров и практики интерпретации геохимических полей. Получило методическое значение при эксплуатационной разведке на уральских месторождениях (от угольных и бокситоносных бассейнов до железистых оруденений). Опыт измерений геоблоков (электро- и магнитометрия в объемной постановке) и образцов (рентгено-флуоресцентный анализ РФА; в лаборатории и на портативных устройствах) распределился между месторождениями неравномерно, так и между дисциплинами от малости опыта измерений РФА, первые сотни образцов до электрометрии в сотни га изученных площадей.

Металлометрический принцип. Перечень свойств, детерминирующих ресурсную оценку и выделение петрохимических сортаментов, известен и по-новому используется: 1. содержание и электронные индивидуальности элементов (металлов), 2. плотность, структура, типы связи (металлическая, ионная, ковалентная), магнитная восприимчивость (уровень магнетизации). 3. Дифференциация свойств (п.2) и электропроводности обусловлена составом (п.1) и термобарическими воздействиями.

Актуальность разномасштабной сырьевой оценки, измерений, представляющих по сути отдельный вид геохимической регистрации, авторы связывают с параметрическим применением петрофизических констант окислов (Таблица) и универсальной формулы (оригинальным ее обновлением смежными связями). Относительно сильным металлам: Mg, Al, Fe (2-sp и d), количества окислов которых и сочетания, единственно, определяют показатели извлечения основной продукции: огнеупоров (магнезит, габбро, хризотиласбест), глинозема (бокситы), железорудных концентратов (титаномагнетиты), принадлежит так же способность неравномерно влиять на свойства гео-материала в целом, т.е. «повышать» стационарные свойства: плотность, структуру (типы связи, от ковалентной к ионной и к металлической), электропроводность, магнетизацию. «Повышения», обусловленные насыщением Si, Ca и щелочных металлов, напротив, контролируются только теми сильными (восстановленными) металлами и их количествами, которые в каждом геологическом случае оказываются замещены. Поэтому, в залежах кварца; известняков (от 5 до 8-ми областей промышленного применения), а в отдельных случаях и на месторождениях строительных материалов (щебней, гравия- галечника, песков и супесей), к пользе ресурсной оценки необходимо регистрировать обратные, окислительные вещественные преобразования.

Таблица 1. Свойства минералообразующих окислов.

Окислы: Электронный минералы, тип агрегаты- фазы Zx+ (формула, металлы-металлоиды, катионы x+)		I- по данным изучения мономинералов (измерено на образце); II- по данным изучения руд и пород (измерено*, ***измерено*** и ***вычислено*****)							
		Плотность, Уд. вес, **σ**, г/см^3		Электросопротивление, УЭС, ***ρ*** Ом.м		Магнитная восприимчивость, МВ, **χ** 10^{-5} ед. Си		Структура	
		I	II	I	II	I	II	I	II
Окись кальция, известь (CaO)	sp	2.715	***2.715***		***12000***				Известняк- ковалентный тип связи
Магнезия (MgO)	sp	-	***3.25***	-	***400***			Высоко Т- разновидность: периклаз **σ** = 3.7- 3.9	Магнезия (***магнезиальная структура***)
Глинозем (Al_2O_3)	sp	-	***3.75***	-	***20***		Бж*:370-4400; Б: 12-880.	«ударные» р-,Т- параметры:дефекты-корундиты; **α**-Al_2O_3 структура- корунд; **χ**=1.8;**σ**=4.0	Глинозем (***не выше*** **Θ**-,**γ**-Al_2O_3 структур); * Бж- боксит железистый; Б- боксит
Гематит (оксид Fe3+) Fe_2O_3	sp	Г*5.1		10^{-4}		Г*: 130-1300; м: 4-25· 10^{-5}		* Гематит **α**- Fe_2O_3 ; маггемит γ- Fe_2O_3 , **σ**= 4.88	В габбро, рудах асбестов и титаномагнетитов ***Fe восстановлено, поэтому маггемит***
Вюстит (оксид Fe2+) FeO	sp	-		-		-		Слабый стехиометрический дефект- недостаток металла, избыток вакансий катиона, формула дается, как $Fe_{1-x}O$	В оруденениях асбестов и титаномагнетитов ТМ ассоциирован с гематитом в шпинели.
Магнетит (ферромагнетик, смесь оксидов Fe3+ и Fe2+) Fe_3O_4	d	5.09		10^{-5} (10^{-2} -10^{-1})		8.8- 25· 10^{+5}	О*:0.01-20;П:0.3 - 4.5;ТМ : 13	Стехиометрический дефект формулы Fe_3O_4 недостаток металла, избыток вакансий катиона, имеет место формула Fe_nO_4 (n<3)	Шпинель изоморфного примесного ряда (чаще всех Al,Mg./ **χ**= 2.8 **σ**=3.6 (3.5-3.7)) *О-оливин,П-пироксен; ТМ-титаномагнетит **σ**=4.72 (4.4- 4.9)
Оксид скандия (ScO)	***d****								Изоморфно в бокситах, ТМ
Оксид титана (TiO2)	d	Р*4.1				Р* 10.6		* Р- Рутил **σ**= 4.23(4.18- 4)	Изоморфная примесь в ТМ
Оксид ванадия(V_2O_5)	d								Изоморфная примесь в ТМ
Магнезиоферрит ($MgFe_2O_4$)	d			$3\cdot10^{-1}$		$10\cdot10^{-5}$			Магнезиальная шпинель
Сидерит ($FeCO_3$)	d	3.79		10^{-3}- 10^{-4}		2500-7500			

* по материалам литературных банков данных.** (жирным курсивом) получены авторами, обсуждаются, как петрофизические константы.

Что так же относится и к месторождениям углей с позиций отдельной, симметричной оценки зольности. Примеси сильных металлов здесь, напротив, выступают как фактор ухудшения качества, засоренности. Как и ценные «подпродукты» титаномагнетитов: TiO2, V2O5, асбестов: ScO, несмотря на малые содержания, окислы d- металлов представляют «дефекты» структуры, диагностируются, в отличие, как источники («точки») люминесценции, флуоресценции в рентгеновском излучении.

Отдельные методические результаты. Вместе с изучением образцов (как измерений, так и оценки структурных свойств) необходимы обмеры в сплошных равномерных полях до глубин 10, 15, 20 метров, фиксирующие распределение качества полезного ископаемого в горном блоке [6]. Методически закладывается наблюдение геохимических полей, или с предполагаемой возможностью интерпретации состава. Магнито-каротажный метод эксплуатационной разведки на оруденениях титаномагнетитов дает инструментальные, неразрешимые ошибки измерений. Это вызвано чередованием со шлировыми, продуктными структурами плагиоклазитовых жил различной сетки и мощности, в обедненных сортах представляющих протяженные «изолирующие» включения. Электрометрия, в силу объемности поля и объемной постановки измерений, в противоположность изучению «сигнала» магнетизации, возможному только на поверхности источников, «сохраняет» добротную разрешающую способность. Данные эл.свойств (в рисунках и чертежах) не утрачивают связи с реальным геохимическим полем. Высоким сортам, в отличие, свойственно рассеянное «засорение» силикатными минералами: от не смыкающихся зерен до отдельных фаз (микрочастиц и агрегатов); сигнал магнитной восприимчивости добротен и отражает состав; рисунки электро- и магнитометрии в объеме блока идентичны. Петрофизические решения длительное время были не оценены – ранее ощутимо сказывалось отсутствие эмпирического прогноза на смежных, технических примерах в области изучения полупроводников, характеризующего петросвойства, которые одно-направленностью и монотонностью своих изменений необратимо повторяют химические изменения.

Интерпретация на новом уровне разнородных геоданных, существенной их части, полученной в целях ресурсной оценки, дает возможности в выявлении детерминирующей роли состава; повысит актуальность создания методик и технических средств регистрации геохимических полей, ранее не совершаемой при традиционных подходах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11- 05- 00159- «а») и УрО РАН (грант № 14- 5- ИП- 6).

Список литературы.

1. Адамов Э.В., Алексеева Т.И., Андреев Е.Е. и другие Технологическая оценка минерального сырья: Справочное пособие.- М.: Недра, 1990.- 264 с.
2. Кузин В.Ф. Способы и системы оперативного контроля для управления качеством руд/ Науч. редактор С.Л. Корзин.- М.: Издательство Московского государственного горного университета, издательство «Горная книга», 2008.- 374 с.
3. Золоев К.К., Шмаина М.Я., Чемякин В.И., Башта К.Г. Поиски, разведка и промышленная оценка месторождений хризотиласбеста.- М.: Недра, 1979.- 94 с.
4. Захаров А.Ф., Вечер Н.А., Леконцев А.Н. и другие Качканарский ванадий.- Свердловск: Средне-Уральское Книжное издательство, 1964.- 303 с.
5. Геометризация оруденений с применением электрометрии (на примере месторождений огнеупоров и бокситов) / А.В. Тимохин, Ю.В. Лаптев, Р.С. Титов, А.М. Яковлев// Изв. вузов. Горный журнал. – 2012.– №6.– С. 94- 102.
6. Разномасштабные измерения металлов и петрофизическая основа высокоточной технологической оценки комплексного потенциала Уральских суперкрупных оруденений / Р.С. Титов, А.В. Тимохин, О.Д. Желтышева, Е.Ю. Ефремов, К.С. Титов // Сб. науч. тр. 11 Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблема освоения недр в XXI века глазами молодых », 24-28 ноября 2014 г/ ИПКОН РАН. – Москва, 2014

«ВЛАГОМЕРНАЯ» МЕТОДИКА ЭЛЕКТРОМЕТРИИ КАК ПРИНЦИПИАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОЙ, БЕЗОПАСНОЙ ГЕОМЕТРИИ ДОБЫЧНЫХ БЛОКОВ НА РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ КАРЬЕРАМИ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ И ХРИЗОТИЛАСБЕСТА

А.В. Тимохин, Ю.В. Лаптев, В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев
ukrigd15@mail.ru, Институт Горного Дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Алгоритм измерения и интерпретации внутреннего, трещинного строения горных блоков.

ELECTROMETRIC REGISTRATION OF A LAYER OF WATER AS THE FUNDAMENTAL SOLUTION OF CREATING A SUSTAINABLE, SAFE GEOMETRY MINING BLOCKS TO DEVELOP CAREERS IN THE FIELDS OF TITANOMAGNETITES AND ASBESTOS.

A.V. Timokhin, Ju.V. Laptev, V.D. Kantemirov, R.S. Titov, A.M. Yakovlev
ukrigd15@mail.ru, IME OF UB of RAS – Institute of Mining of Ural Branch of Russian Academy of Science, Ekaterinburg, Russia

A summary of the report. An algorithm for the measurement and interpretation of internal structure of a mountain fissure blocks.

О проблеме. При отработке месторождений титаномагнетитов и хризотиласбеста возникают геомеханические задачи, классифицируемые как строительные (действие отдельных СНиП, ГОСТов и др.), направленные на обеспечение устойчивости капитальных выработок и несущих конструктивных элементов карьеров, безопасности персонала в рабочих зонах. Ведется текущая оценка устойчивости блоков и уступов- неотъемлемой части формируемых бортов. Сложные геомеханические задачи возникают при обустройстве внутрикарьерного пространства и, по мере отработки, при постановке карьеров в предельное положение.

Актуальность изучения внутренней структуры горных массивов. Геометрия блоков, берм и откосов формируется в результате ведения буровзрывных работ БВР. Наряду с фактором «волновой природы» взрыва важен фактор литологического строения. Массивы титаномагнетитов (оруденения Качканарские, Сосновские) и асбестов (Джетыгаринское, Баженовское месторождения) объединяет магмогенное происхождение, ультраосновной состав в общих классификациях интрузивных пород (перидотиты и верлиты), а отличает то, что при механическом, разрушающем (/для отбойки горной массы) воздействии взрыва первым свойственно преобладание упругих деформаций, вторым – упруго-пластических .

Объект и предмет геометризации. В сложившейся внутрикарьерной геометрии, как показывает маркшейдерская документация, существенные отклонения от проектных положений значительно чаще отмечены и имеют место при отработке титаномагнетитов, нежели асбестов. Отдельно свойственны месторождениям – отличия плотностей, контрасты прочности на литологических контактах. Тогда как, встречаемость в линейных планах забоев неоднородностей, количества разновидностей руд и пород, геометрическое многообразие параметров залегания их контактов, в целом сравнимы и похожи.

Идея – по основаниям необратимости связи влажности с эл.сопротивлением выделить полезный сигнал, отделяющий верхний, искусственно трещиноватый слой (воздействие БВР) от нижнего, естественно- пористого и монолитного, который залегает гораздо ближе к подошве блоков (глуб. в 15 м.). Скачок влажности к природному уровню должен на графиках зондирований выражаться «перегибом» и понижением сопротивления. Источник геоданных для влагомерной интерпретации – измерения объемных распределений сопротивления в создаваемом сплошном, равномерно- мало- глубинном электрическом поле.

Горный блок (уступ) и откос имеют особенности внутренней структуры по трещиноватости в зависимости от концентрации «ослабляющих» жил плагиоклазитов, что подробно описано в литературе [1]. В силу воздействия БВР при отбойке верхнего горизонта, так и прилегающего блока в пределах горизонта, непосредственно у открытых поверхностей

и вглубь блоков имеется «разрыхленная» часть массива, так называемый «искусственный слой» и его глубина, как граница с массивом неизменного строения и, соответственно, с естественной (природной) монолитной «упаковкой» [2].

По показателям трещиноватости и влажности слой «искусственный» отличается от «монолита». Если природная упаковка характеризуется: пористостью n0, коэффициентом пористости Kn= 1 / (1-n0), природной влажностью W0 (>>0). То искусственный слой характеризует большая пористость n1= n0 + Δn, взамен Kn применяется термин «коэффициент разрыхления» Kp = 1 / (1- n0- Δn), гораздо меньшая влажность W1→ 0 (W0 >> W1). Эти же показатели, например в инженерных изысканиях и строительной деятельности, и обозначения (например, рисунки) применяются на искусственных сооружениях: отвалах, насыпных объектах. И элементы методики и признаки, обусловленные водными свойствами и трещиноватостью массивов, имеет смыл повторить, отталкиваясь от примеров изучения авторами отвалов и карстов…

Обсуждение постановки задачи, обзор имеющихся подходов, возможные решения.

Изучение титаномагнетитовых залежей Качканарского типа (Гусевогорское месторождение, Северный карьер, гор. 215 и 235) дало основания отдельному и сравнительному обсуждению свойств и параметров (рис. 1). Во внутренней структуре массива неоднородности прочностных свойств находятся в зависимости от количеств и сочетания титаномагнетитов (плотность σ= 4.05 т/м^3) и жил плагиоклазита П. (плотность уровня «битовнита» σ= 2.73 т/м^3). Как показано на рисунке, при БВР на участке контакта руд с полувертикальной, мощной- до 16 м жилой плагиоклазита образовался «карман» - узкая, полосой разрушившаяся часть блока, до 11 метров во внутрь блока (график hw под рисунком, шифр графика- номер горизонта 235) от желаемой линии заоткоски (зафиксировано в маркшейдерском плане), параллельной профилям скважин БВР; более пологий склон откоса.

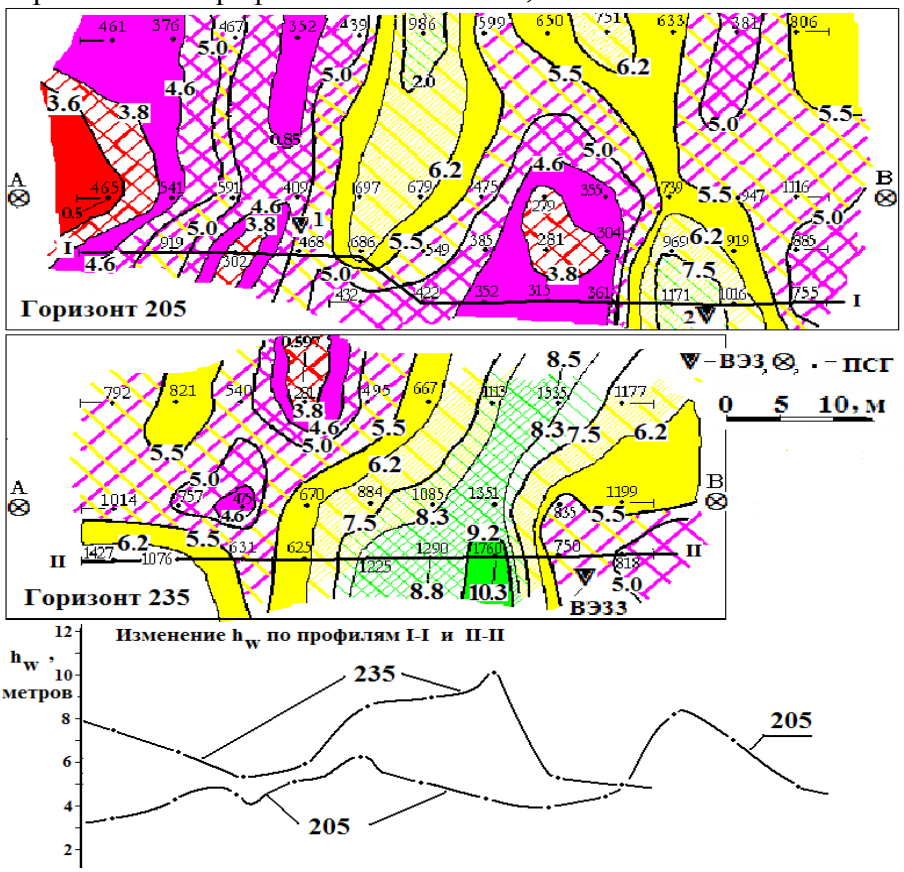


Рис. 1. Объемная съемка внутренней структуры блоков титаномагнетитов по трещиноватости (гор. 205, 235). Шифр изолиний hw- глубина искусственного слоя «И», обладающего пористостью n1= n0 + Δn и характеризующегося коэффициентом разрыхления Kp. Цветом выделен симметричный повышению плотности рост качества титаномагнетитов: от зеленого (min плотность в жилах плагиоклазита), желтого к розовому, красному.

На недопущение формирования геометрии, вредной устойчивости блоков в рабочей зоне, направлено несколько известных подходов. Их объединяет область и терминология изысканий, инженерной геологии. Преобладает идея – на массивах высоких содержаний плагиоклазитов понижать расходуемое ВВ. Имеется классификация, включающая 5-типов руд по прочности и нормы заряжания. Эта гипотеза, вероятно, практически не испытывалась, так как, видимо, при неравномерной детонации есть опасения получить побочные, вредные эффекты… Но, в то же время, все имеющиеся технические идеи в этой области осложняет даже на уровне экспериментов следующее. Необходимы ответственные, обоснованные решения, а решениям – информация, которой нет вообще, или нет оперативного метода ее (информации) получения. В частности, слабостью идеи «неравномерного заряжания» является невозможность отнесения участка блока к низкой прочности только по выходу светлого (плагиоклазового) шлама скважин; отсутствие прикладных моделей действия «волновой природы», как и неизвестные размеры участков низкой прочности. Имеются первичные наработки сейсмического метода и сейсмич. модели блока, но аномальные концентрации плагиоклазита в полном разрезе блока - не обязательное условие выхода его жил на поверхность, что обязательно для успешного картирования при полевой сейсмометрии и по методу МПВ.

Подход и метод решений – изучение регистрационных возможностей электрометрии для картирования в объемной постановке внутренней структуры блока по трещиноватости.

Методика. Первичные электрометрические измерения (иновационная объемная постановка наблюдений) в рамках эксплуатационной разведки (ЭР) были направлены на картирование контактов руда- порода, так и распределений в блоках качества, т.е. контактов залегания различных руд. Отдельно выполнялись гидрогеологические расчеты- неотъемлемая часть методики. Установлен картировочный критерий регистрации hw- мощности и глубины искусственного слоя («И») – РЕЗКИЙ РОСТ ВЛАЖНОСТИ (рис. 2).

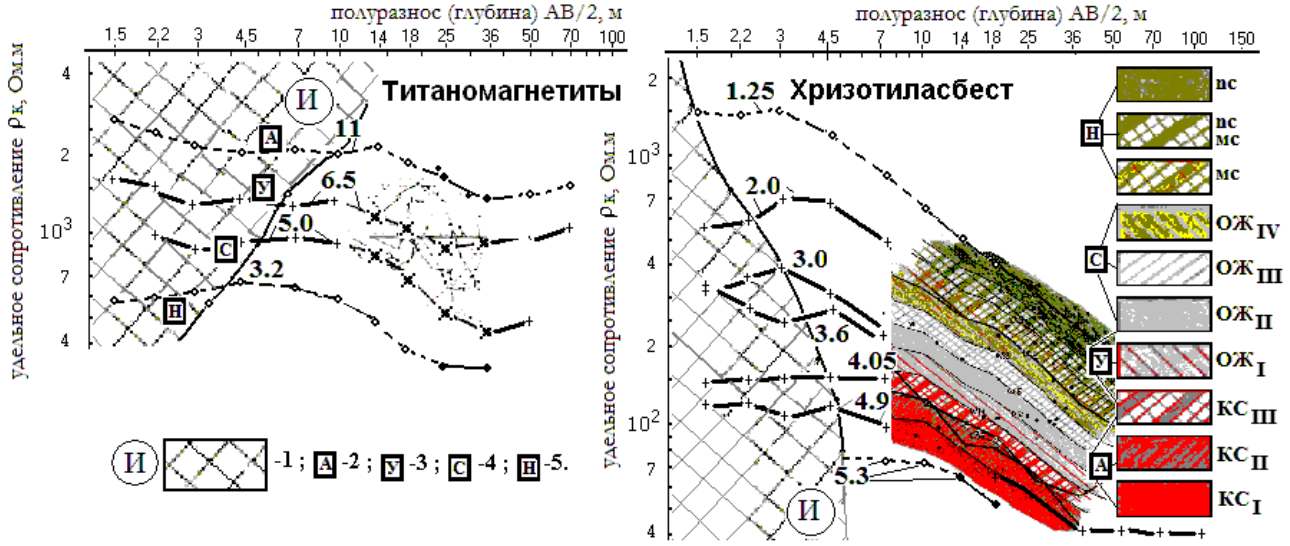


Рис. 2. Установленные на примерах измеренных графиков ВЭЗ тарировочные связи эл.сопротивлений (ρк, Ом.м) и внутренней структуры блока по трещиноватости.
Шифр графиков: hw- глубина искусственного слоя «И».

Поисковый признак и методика регистрации – влагомерные. На рисунке 1 показано, как влияет на геометрию блоков сочетание (сочленение) и контакты этих типов руд на гор. 215 и 235 на примере сформировавшейся геометрии бермы и откоса (график hw) . Максимум hw зафиксирован в рудоминеральном массиве, вмещающем наиболее крупные жилы, и составил 11 метров. Измерения позволяют выделить категории блоков по прочности в зависимости от концентрации жил плагиоклазитов в разрезе (до 15 м): «А»- аномальная, «У»- умеренная, «С»- средняя (рядовая), «Н»- низкая (мелкая сетка жил).

В пределах титаномагнетитов показаны отличия эл. сопротивлений по категории и

параметрам подверженности разрушению, различной глубины «карманообразования» при взрывах: «А»- аномальная, «У»- умеренная, «С»- средняя (рядовая), «Н»- низкая (мелкая сетка жил плагиоклазитов). На асбестах тем же категориям от «А», «У» до «С», «Н» поставлены в соответствие категории сырьевого качества: КС- крупная сетка, ОЖ- отороченные жилы, мс- мелкая сетка, пс- некондиционные руды (рис. 1, 3).

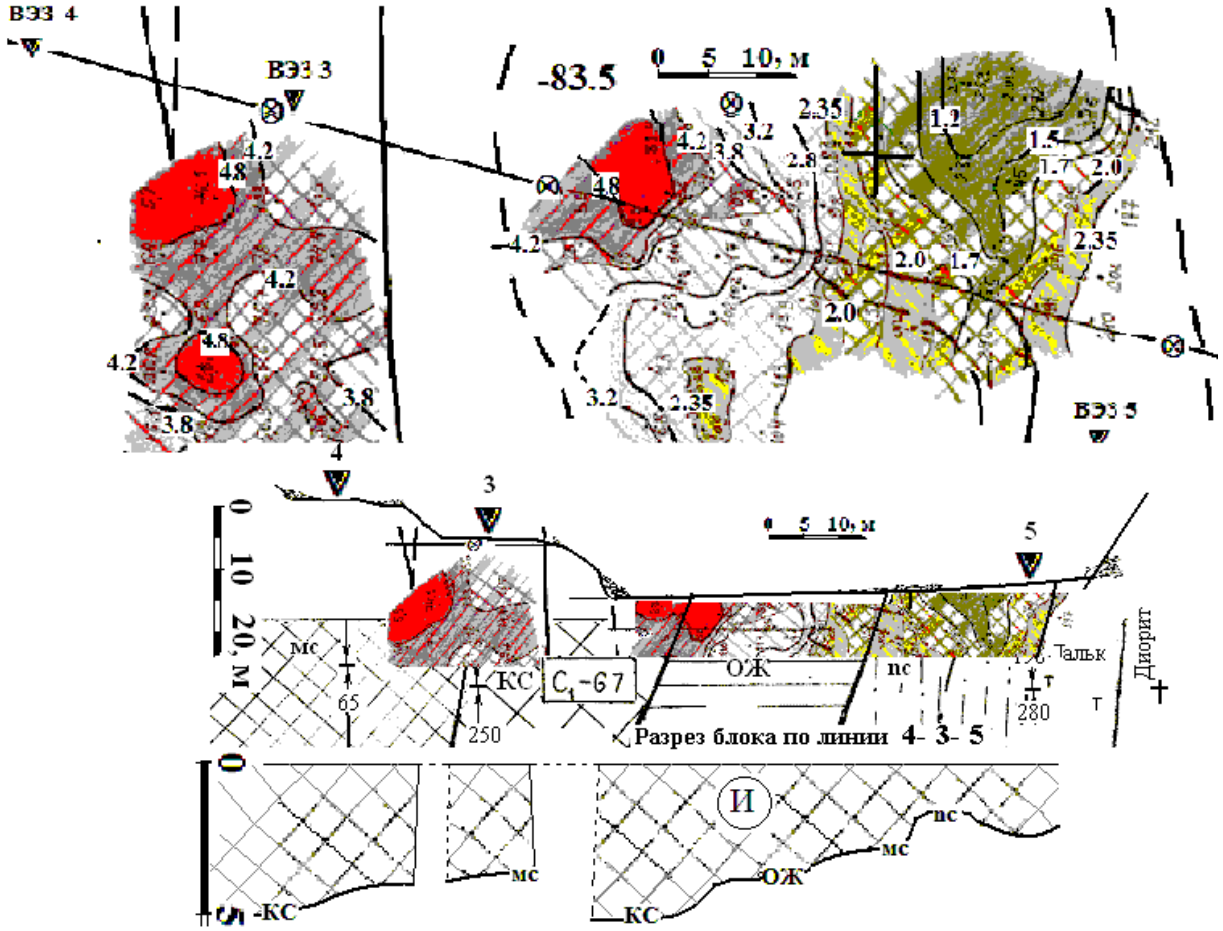


Рис. 2. Объемная съемка внутренней структуры блоков хризотиласбеста по трещиноватости (Баженово, залежь Южная2). Шифр изолиний hw- глубина искусственного слоя «И», обладающего пористостью n1= n0 + Δn и характеризующегося коэффициентом разрыхления Кр. Цветом выделен симметричный повышению плотности рост качества асбестов: от зеленого (min плотности в некондиционных асбестах), желтого к розовому, красному.

Выводы. Предложена идея и методика измерения внутренней структуры блоков на месторождениях, позволяющие в объемной постановке параметрически отделить верхний трещиноватый слой массива от нижнего, монолитного. В последнем имеют место (сохранены) значительные количества влаги- измеренный поисковый признак. Параметры залегания и параметры буровзрывных работ БВР единственно определяют, какую при отбойке следует ожидать геометрию блоков. Ожидаемое применение геоданных нового интерпретационного уровня будет способствовать решению геомеханических задач, позволит получить ряд конкретных экономических эффектов. Прикладное направление – создание методик и отдельных измерительных приемов, в общей геотехнологии способствующих снижению и недопущению в будущем сырьевых потерь и разубоживания в аварийных выработках, блоках и бортах карьеров.

Список литературы.

1. Захаров А.Ф., Вечер Н.А., Леконцев А.Н. и другие… Качканарский ванадий.- Свердловск: Средне-Уральское Книжное издательство, 1964.- 303 с.
2. Чернышев С.Н. Трещиноватость горных пород и ее влияние на устойчивость откосов. – М: «Недра», 1984.- 111 с.

УДК 550.838.22+550.837

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ПОИСКАХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ НА ПРИМЕРЕ ТОХТИНСКОЙ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ

И.М.Хасанов[1], Л.А.Муравьев[2], В.А.Терновский[1,3], А.В.Ткачев[1]

1 – Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан, Россия, hasanov@neisri.ru

2 – Институт Геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, mlev@mail.ru

3 – ООО «Золотодобывающая корпорация», пгт. Ягодное, Магаданская обл., Россия

Комплексные геофизические работы проведены на Тохтинской перспективной площади в Магаданской области с целью поисков участков, перспективных на выявление крупнообъемных месторождений золота. Использовались высокоточная магниторазведка с применением оверхаузеровских магнитометров MMPOS-1, электропрофилирование методом срединного градиента и вертикальное электрозондирование для уточнения геологического строения, определения положения рудоконтролирующих структур, выявления возможной золотой минерализации в межжильном пространстве с последующей оценкой прогнозных ресурсов золота.

GEOPHYSICAL PROSPECTIN IN SEARCH OF ORE GOLD DEPOSITS IN MAGADAN REGION (ON TOHTO PROSPECTIVE AREA)

***I.M. Khasanov[1], L.A.Muravyev[2], V.A.Ternovsky[1,3], A.V.Tkashev[1]**, hasanov@neisri.ru*

1 – North-eastern Integrated Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan, Russia

2 – Institute of Geophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

3 – LC "Gold Mining Corporation", Yagodnoye, Magadan, Russia

Complex geophysical works were carried out on Tohto prospective area in Magadan region, Russia, with the aim of searching for sites promising to reveal large-volume gold deposits. High precision magnetic survey with Overhauser magnetometers MMPOS-1, electric profiling method of the median gradient and vertical electrical sounding were used for identification of geological structures, determine of the ore-controlling structures position, identifying possible gold mineralization in between-vien space, and for evaluation of forecast gold resources.

Территория Магаданской области входит в число крупнейших золотосеребряных провинций мира [1]. За 80 лет из ее недр добыто около 3 тысяч тонн золота, в основном из россыпных месторождений (90% от общего количества). С 1975 года добыча золота из россыпей неуклонно уменьшается из-за снижения сырьевой базы этого типа месторождений. Перспективы добычи драгоценных металлов из рудных месторождений значительно выше, несмотря на более сложные технологии их извлечения. Поиск и разведка новых рудных месторождений на этой территории – чрезвычайно актуальная задача.

Тохтинская площадь расположена на юго-восточном фланге Яно-Колымского золотоносного пояса и входит в состав Центрально-Колымского горнорудного района. В настоящее время перспективы района связываются с коренными месторождениями, прогнозные ресурсы которых оцениваются некоторыми исследователями в 500-600 т золота. В районе известны коренные месторождения и рудопроявления, как традиционной золото-кварцевой формации (дайковый и собственно кварцевый типы), так и перспективные золото-редкометалльные проявления штокверкового типа, связанные с гранитоидами [2].

Территория района характеризуется относительно высокой степенью изученности. Первые сведения о золотоносности бассейна р. Среднекан получены в 1908-1912 гг. Планомерное изучение района начато с 1928 г. экспедицией Геолкома, которой обнаружена золотоносность даек в бассейне р. Среднекан. В 1934 г. была установлена россыпная оловоносность верховий Оротукана, а позднее в 1939 г. открыто оловорудное месторождение Кинжал. В 1983-1984 гг. в результате геолого-съемочных и поисковых работы масштаба 1:50 000 под руководством В.Н. Егорова на площади листов Р-56-65-А, Б; Р–66-А были выявлены многочисленные проявления рудного золота, серебра, олова, полиметаллов,

уточнены параметры и проведена переоценка известных рудопроявлений. По результатам литохимической съемки по вторичным ореолам рассеяния выделены четыре аномальные площади: Лево- и Право-Тохтинская, Безымянная, Голоднинская [3].

Целевым назначением работ, проведенных ООО «Золотодобывающая корпорация» в 2012–2014 гг являлась локализация участков, перспективных на выявление крупнообъемных месторождений золота на Тохтинской перспективной площади в границах лицензии, уточнение геологического строения, определение положения рудоконтролирующих структур, выявление возможной золотой минерализации в межжильном пространстве с последующей оценкой прогнозных ресурсов золота. Полевые работы включали проходку канав, бурение скважин, поисковые маршруты, литохимическое опробование, специализированные исследования, штуфное и точечное опробование, комплекс геофизических исследований. Основной объем поисковых работ был сконцентрирован на выделенных в предполевой период поисковых участках: Правое Тохто, Крохалиный, Центральное Тохто, Голодный. Основным направлением работ было выявление большеобъемного золотого оруденения, в том числе штокверкого типа, предпосылки к которому были установлены предыдущими исследователями.

Для решения этих задач геофизическими методами предусмотрен комплекс, включающий электроразведку методами СГ-ЧД, ВЭЗ-ВП, ЗСБ и магниторазведку. Геофизические работы проводились по заранее подготовленной топосети, единой для всех методов в соответствии с действующими инструкциями для работ масштаба 1:25 000.

В результате пробных работ на данном участке был выбран комплекс методов электроразведки, который включает в себя метод симметричного электрического профилирования (СЭП) и метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Для проведения электроразведочных работ был применен аппаратурный комплекс, состоящий из приемника «МЭРИ-24» и генератора «АСТРА-100». «АСТРА-100» генерирует сигнал формы «меандр» с частотой от 0,063 до 2500 Гц и силой тока от 1 до 1000 мА и имеет возможность программирования режима работы: 7 программ до 16 шагов в каждой. Благодаря небольшому весу (около 4 кг вместе с аккумулятором) и удобной сумке для переноски, генератор «АСТРА-100» хорошо подходит для профилирования и других методик, предполагающих частые перемещения питающей линии. Работы были выполнены по методике срединного градиента [4] по магниторазведочной сети шагом 20 метров.

После проведения электропрофилирования и получения предварительных результатов сделан вывод о необходимости проведения дополнительных работ в связи с горизонтальной направленностью данного метода. Был выбран метод ВЭЗ трехэлектродной установкой. Электрод А питающей линии АВ передвигается непосредственно по профилю с шагом в десять метров, а электрод В заземлен на бесконечности (≈1500–2000 м). Приемная линия MN = 20 метров, на одном пикете производится восемь замеров, при этом MN с каждым замером передвигается на 20 метров дальше от питающего электрода А. После восьми замеров генератор и питающий электрод А переходят на новый пикет (10 м). Точка записи О находится в центре MN. Расстояние АО в начале каждого пикета составляет 20 м и увеличивается с каждым замером на 10 м. Для выполнения зондирования производят серию измерений, постепенно увеличивая размер питающей линии АВ. Использовался приемник «ИМВП 8» и генератор «Астра».

Магниторазведочные работы проводились для разделения геологических разностей пород по магнитным свойствам, выделения зон тектонических нарушений, оценки элементов залегания магнитовозмущающих объектов, выявления и прослеживания ареалов и зон гидротермально измененных пород, отдельных маломощных тел гидротермалитов и кварцевых жил. Использовались пешеходные оверхаузеровские магнитометры MMPOS-1 [5]. Съемка выполнялась по сети наблюдений 20×100 м на высоте 2 м. Координаты точек измерения определялись с помощью приемника GPS, связанного с магнитометром. Вариация магнитного поля земли регистрировалась с помощью аналогичного магнитометра, стационарно установленного вблизи лагеря полевого отряда.

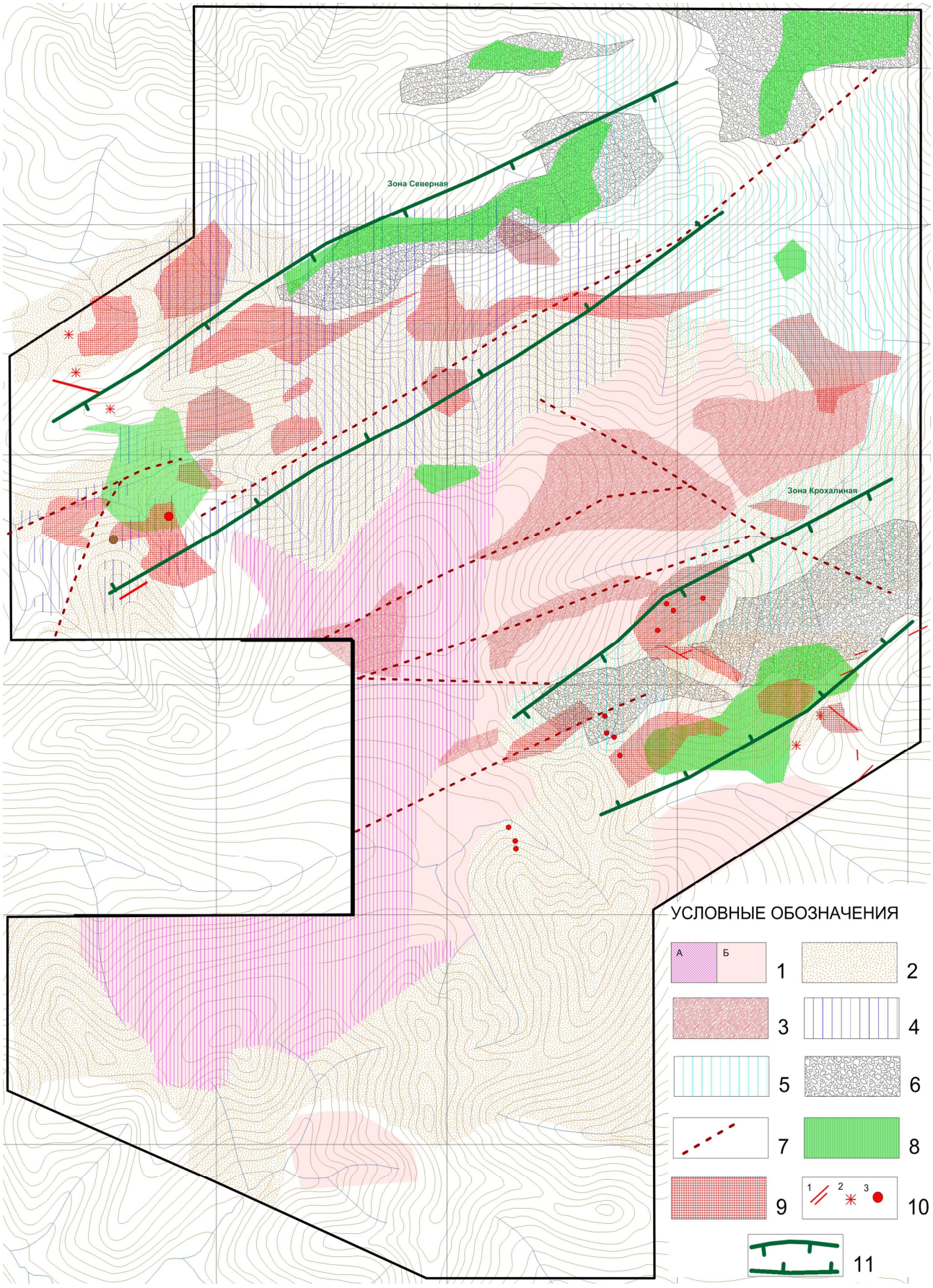


Рис. 1. Участок Крохалиный. Схема интерпретации геофизических данных. Условные обозначения разъяснены в тексте ниже.

На основе структурно-морфологического анализа магнитного поля и результатов электроразведочных работ составлена интерпретационная схема геофизических аномалий, приведенная на рис 1, обозначения на котором соответствуют следующим объектам:

1. Спокойное, ровное слабо отрицательное (от -5 до -35 нТл) магнитное поле (А, Б), осложненное локальными аномалиями (Б); дифференцированное, но в целом повышенное сопротивление (свыше 5000 Ом·м). Интрузивное тело (гранитоиды Верхнеоротуканского массива: А, Б), фрагментарно измененное (Б).
2. Дифференцированные (от -100 до 150 нТл) магнитное поле, а также дифференцированное, но в целом пониженное (менее 4000 Ом·м) кажущееся удельное сопротивление. Контактово измененные осадочные породы в надынтрузивной зоне.
3. Линейные и овальные зоны пониженного сопротивления (2000–4000 Ом·м), расположенные в пределах интрузивного тела. Зоны и области метосоматической проработки, приуроченные к разрывным нарушеняним.
4. Участки концентрации интенсивных положительных локальных магнитных аномалий. Зоны контактовой гидротермально-метосоматической проработки с привносом магнитных минералов, зоны пирротиновой минерализации.
5. Участки концентрации локальных отрицательных (от -70 до -220 нТл) магнитных аномалий. Отождествляются с зонами интенсивных метаморфических изменений и контактовой гидротермально-метосоматической проработки, возможно с привносом магнитных минералов «обратного» намагничения.
6. Линейные аномалии пониженного сопротивления (менее 2000 Ом·м) в пределах вмещающих осадочных пород. Зоны дробления и трещиноватости.
7. Линии нарушения корреляции геофизических аномалий. Разрывные нарушения.
8. Локальные положительные аномалии коэффициента частотной дисперсии (Кчд). Области и зоны сульфидной минерализации.
9. Локальные отрицательные аномалии Кчд. Зоны площадного окварцевания.
10. Кварцевые жилы (1), их развалы (2) и точки минерализации (3)
11. Прогнозируемые золоторудные жилы.

Спокойное слабо отрицательное магнитное поле отмечает выходы на дневную поверхность гранитоидов Верхнеоротуканского массива. Области, характеризующиеся относительно повышенным магнитным полем интерпретируются как участки распространения умеренно контактово-измененных осадочных пород в надынтрузивной зоне. Мощность контактово-измененных пород, по-видимому, значительна, составляет не менее 200 метров. Наиболее интенсивные магнитные аномалии, сконцентрированы в основном в северо-западной части участка (зона Кинжал), которая по радиометрии характеризуется калиевой специализацией и соответствуют областям развития сульфидизированных, в том числе пирротинизированных пород, вмещающих преимущественно оловополиметаллическую рудную минерализацию.

Области и зоны, для которых типичны сопряженные знакопеременные локальные аномалии магнитного поля интенсивностью от -130 до 250 нТл, фиксируют положение гидротермально-метасоматически измененных пород в зоне экзоконтактого влияния интрузивного массива. К известным золотым рудопроявлениям приурочены локальные отрицательные магнитные аномалии, либо линейные зоны градиентов. Указанные характеристики могут являться критерием оценки перспективности данной площади и определять контуры потенциально рудонесущих структурных элементов. Данный тип поля контролируется разрывными нарушениями, имеющими восточное и северо-восточное простирание. Он развит в пределах восточной и юго-восточной (зона Крохалиная) части участка, пространственно совпадает с уран-калиевой радиогеохимической доминантой и, очевидно, вмещает установленную на этой территории золоторудную минерализацию. Не исключено, что отрицательные аномалии с интенсивностью свыше -300 нТл могут быть связаны с магнитными (пирротинизированными) породами, которые обладают обратным

намагничением. Пространственное совпадение выявленных проявлений золота и отрицательных магнитных аномалий дает возможность предположить, что формирование оруденения происходило в интервал времени, совпадающий с инверсией магнитного поля Земли. Возможно, интенсивные отрицательные магнитные аномалии могут являться одним из важнейших признаков процессов рудообразования на исследуемой территории.

Известные точки рудной минерализации пространственно совпадают с локальными положительными и отрицательными аномалиями коэффициента частотной дисперсии (Кчд). Участки распространения интенсивных локальных положительных (предположительно определяющих сульфидизацию) и отрицательных (предположительно связанных с площадным окварцеванием) аномалий Кчд можно рассматривать как перспективные. По данным электропрофилирования, по указанным критериям выделяются зоны площадной (штокверкоподобной) кварц-сульфидной минерализации, которые сопровождаются золоторудными и оловорудными проявлениями, а также точками рудной минерализации.

Рудопроявления, выделенные в верховьях ручья Левый Крохалиный по геофизическим признакам объединяются в единую зону (зона Крохалиная) протяженностью более 2,5-3 км и мощностью до 800 метров. Выделенная перспективная зона имеет северо-восточное простирание. Геофизические работы указанным комплексом методов проведены здесь по сети 5×20 м для детализации геологического строения, уточнения положения рудоконтролирующих разрывных нарушений, зон метасоматической и гидротермальной проработки. Комплексный анализ в пакете программ «КОСКАД 3D» [6] электрических и магнитных данных в совокупности с геолого-геохимическими материалами дает возможность определить средние физические величины и геометрические параметры наиболее перспективных интервалов зоны Крохалиная.

В ходе проведения поисковых работ установлено, что вмещающие золотое оруденение зоны характеризуются незначительными размерами. При мощности в первые метры, прослежены на первые сотни метров по простиранию и первые сотни метров на глубину. Оруденение в зонах распределено крайне неравномерно, все установленные прогнозируемые рудные тела, в основном, жильно-прожилкового типа. В пределах изученных участков Тохтинской площади локализованы и оценены прогнозные ресурсы золота категории P_2 - 18,3 т. Золотое оруденение Тохтинской площади отнесено к золото-редкометалльной и золото-кварцевой формациям. На основе комплексного анализа выявлено, что добыча рудного золота по данному участку не рентабельна. Это связано с трудной извлекаемостью рудного золота, его достаточно малым содержанием в коренных породах и в кварцевых жилах, что доказано бурением скважин и опробованием коренных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Золоторудные месторождения России /под редакцией М.М. Константинова/. – М.: Акварель, 2010. – 378 с.
2. Шило Н.А., Гончаров В.И., Альшевский А.В. и др. Условия формирования золотого оруденения в структурах Северо-востока СССР. М. Наука, 1988, 182 с.
3. Егоров В.Н. и др. Отчет о геологическом доизучении масштаба 1:50000 в бассейне ручьев Золотистый-Ревком на площади листов Р-56-65-А, Б, -65-А. (Ревкомовский отряд). Пос. Сеймчан, 1985.
4. Хасанов И.М., Ткачев А.В. Учет влияния электромагнитной индукции питающей линии на результаты измерений методом частотной дисперсии с установкой срединного градиента // Геофизика. 2014. № 4. С. 74-79.
5. Муравьев Л.А. Возможности высокочувствительных магнитометров POS при проведении геомагнитных съемок / Л.А. Муравьев // Уральский геофизический вестник. – 2007. – №1(10). – Екатеринбург: УрО РАН. – С. 56-60.
6. Петров А.В., Трусов А.А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации КОСКАД 3D//Геофизика. 2000. № 4. С. 29-33.

УДК 550.830, 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ИЕРАРХИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

О.А. Хачай, olgakhachay@yandex.ru, *Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*
А.Ю. Хачай, andrey.khachay@gmail.com, *Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия*

Аннотация

Цель и задачи. Геологическая среда является открытой системой, на которую действуют внешние и внутренние факторы, которые приводят к неустойчивому ее состоянию. Эта неустойчивость, как правило, проявляется локально, а эти зоны называются динамически активными элементами, которые являются индикаторами потенциальных катастрофических источников. Эти объекты отличаются от вмещающей геологической среды своими структурными формами, которые часто являются формами иерархического типа. Процесс их активизации может наблюдаться с помощью мониторинга волновых полей. Для этой цели необходимо разработать новые алгоритмы моделирования волновых полей, распространяющихся в локальных объектах с иерархической структурой. Также необходимо разработать новую теорию интерпретации для распространения волновых полей, для определения контуров или поверхностей этих локальных иерархических объектов.

Методы. Построен алгоритм 3*D* моделирования электромагнитного поля для произвольного типа источника возбуждения *N*-слойной среды с иерархическим проводящим включением, расположенным в *J*-ом слое. Построены алгоритмы 2-*D* моделирования для дифракции звука и линейно поляризованной поперечной упругой волны на включении с иерархической структурой, расположенной в *J*-ом слое *N*-слойной упругой среды. Мы использовали метод интегральных и интегро-дифференциальных уравнений для пространственно-частотного представления распределения волновых полей. Выписаны уравнения теоретической обратной задачи для 2*D* электромагнитного поля E и H поляризация, а также для дифракции звука и распространения линейно поляризованной упругой волны при возбуждении *N*-слойной проводящей или упругой среды с иерархическим проводящим или упругим включением *l*-го ранга, расположенным в *v*-ом слое.

Результаты. Из построенной теории следует, что при интерпретации данных мониторинга необходимо использовать такие данные, которые получены в рамках систем наблюдения, настроенных на исследование иерархической структуры среды. С другой стороны, чем сложнее среда, тем каждое волновое поле привносит свою информацию о ее внутренней структуре, поэтому интерпретацию сейсмического и электромагнитного поля необходимо вести раздельно, не смешивая эти базы данных. Этот результат содержится и в явном виде уравнений теоретической обратной задачи для рассмотренных случаев распространения волновых полей.

Практическое значение и выводы. Эти результаты являются основой для построения новых систем мониторинговых наблюдений геологических систем. Особенно это востребовано для предотвращения горных ударов в глубоких шахтах при их эксплуатации.

Ключевые слова: иерархическая среда, электромагнитное поле, сейсмическое поле, итерационный алгоритм, уравнение теоретической обратной задачи.

MODELING AND INTERPRETATION WAVE FIELDS IN HIERARCHIC HETEROGENEOUS MEDIA

O.A. Hachay, *olgakhachay@yandex.ru, Institute of Geophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia*
A.Y. Khachay, *andrey.khachay@gmail.com, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia*

Purpose. Geological medium is an open system which is influenced by outer and inner factors that can lead it to a unstable state. That non stability is as a rule occurred locally and these zones are named as dynamically active elements, which are indicators of potential catastrophic

sources. These objects differ from the embedded geological medium by their structural forms, which often are of hierarchical type. The process of their activisation can be searched, using wave fields monitoring. For that purpose it is needed to develop new algorithms of modeling wave field's propagation through the local objects with hierarchical structure. Also it is needed to develop new theory of interpretation the distribution of wave fields for defining the contours of these local hierarchical objects.

Design/methodology/approach. It had been constructed an algorithm for 3D modeling electromagnetic field for arbitrary type of source of excitation in N-layered medium with a hierarchic conductive intrusion, located in the layer number *J*. It had been constructed algorithms for 2D modeling of sound diffraction and linear polarized transversal seismic wave on an intrusion of hierarchic structure, located in the layer number *J* of N-layered elastic medium. We used the method of integral and integral-differential equations for a space frequency presentation of wave field's distribution. It is developed an algorithm for constructing the equation of theoretical inverse problem for 2-D electromagnetic field of E and H polarization and linear polarized longitudinal elastic wave by excitation of the N-layered conductive or elastic medium with hierarchic conductive or elastic inclusion located in the v –th layer.

Findings. From the theory it is obviously that for such complicated medium each wave field contains its own information about the inner structure of the hierarchical inclusion. Therefore it is needed to interpret the monitoring data for each wave field apart, and not mixes the data base.

Practical value/implications. These results will be the base for constructing new systems of monitoring observations of dynamical geological systems. Especially it is needed to prevent rock shocks in deep mines by their exploitation.

Keywords: hierarchic medium, electromagnetic field, seismic field, algorithms of modeling, equation of theoretical inverse problem.

Настоящая работа посвящена разработке алгоритма моделирования электромагнитного эффекта в рамках частотно-геометрической методики при исследовании погруженной в горизонтально-слоистую среду проводящего включения с иерархической структурой.

Алгоритм моделирования распространения переменного электромагнитного поля в *N*-слойной среде с проводящим включением иерархического типа

Алгоритм построен с использованием итерационного подхода решения объемных интегральных уравнений для переменного электромагнитного поля в частотной области. Для модели: проводящее включение, расположенное в произвольном слое пятислойной среды, при возбуждении электромагнитного поля плоской волной, вертикальным магнитным или горизонтальным электрическим диполем алгоритм изложен в работе [1].

Пусть локальная неоднородность имеет следующую структуру: на первом иерархическом уровне – это неоднородность объема V_1 с проводимостью σ_{a1}, на втором уровне – это неоднородности, расположенные внутри объема V_1 и занимающие объем V_2 с проводимостями σ_{aj2} в общем случае. Мы будем рассматривать более простой случай, когда неоднородности второго и большего ранга будут иметь внутри своего ранга одинаковую проводимость, т.е. σ_{a2} . Неоднородности третьего ранга будут занимать объем V_3 в пределах объема V_2 с проводимостью σ_{a3} и т.д. Параметры вмещающей горизонтально-слоистой среды имеют вид $\{\sigma_k, h_k\}$, где k=1,…N, h_k – суммарные мощности слоев, i –номер ранга или иерархического уровня. Задача рассматривается для магнитооднородной среды в квазистационарном приближении.

Объемные интегральные уравнения и соответственно интегральные представления для составляющих электрического и магнитного поля выписываются в виде:

$$\vec{E}_i(M_0) = \vec{E}_0^{i-1}(M_0) + (\sigma_{ai} - \sigma_{k(M_0)})\int_{V_i} \vec{E}_i(M)\hat{G}_E(M, M_0)dV_i \qquad (1)$$

$$\vec{H}_i(M_0) = \vec{H}_0^{i-1}(M_0) + (\frac{\sigma_{ai} - \sigma_{k(M_0)}}{i\omega\mu_0})\int_{V_i} \vec{H}_i(M)\hat{G}_H(M, M_0)dV_i \qquad (2)$$

где i – номер итерации, связанной с номером иерархического уровня, $\hat{G}_E(M,M_0)$ и $\hat{G}_H(M,M_0)$ – тензоры Грина слоистой среды, которые определяются известным способом, описанным в работе [1]. При i=1 $\vec{E}_0^{i-1}(M_0)$ и $\vec{H}_0^{i-1}(M_0)$ – составляющие напряженностей электрического и магнитного возбуждающего или нормального поля слоистой среды. При i=2,…L $\vec{E}_0^{i-1}(M_0)$ и $\vec{H}_0^{i-1}(M_0)$ – составляющие напряженностей электрического и магнитного поля предыдущего ранга с учетом неоднородностей предыдущего ранга. Распределение электрического и магнитного поля можно анализировать последовательно на каждом итерационном этапе перед включением неоднородностей нового иерархического уровня.

Моделирование дифракции звука на двумерной упругой неоднородности иерархического типа, расположенной в *N*-слойной среде

В работе [2] описан алгоритм моделирования дифракции звука на двумерном упругом однородном включении, расположенном в *J*-ом слое *N*-слойной среды. Идея, изложенная в предыдущем разделе для электромагнитного поля, реализована и для сейсмического поля для двумерного случая распространения продольной волны через локальную неоднородность с иерархической структурой, расположенной в *J*-ом слое N-слойной среды.

$G_{Sp,j}(M,M^0)$ – функция источника сейсмического поля для слоистой среды. $k_{1jil}^2=\omega^2(\sigma_{jil}/\lambda_{jil})$ – волновое число для продольной волны, в приведенном выражении индекс ji обозначает принадлежность свойств среды внутри неоднородности, ja – вне неоднородности, l=1…L – номер иерархического уровня, $\vec{u}_l=grad\varphi_l$, φ_l^0 – потенциал нормального сейсмического поля в слоистой среде в отсутствие неоднородности предыдущего ранга, если l=2…L $\varphi_l^0=\varphi_{l-1}$, если l=1, $\varphi_l^0=\varphi^0$:

$$\begin{aligned}
&\frac{(k_{1ji}^2-k_{1j}^2)}{2\pi}\iint_{Scl}\varphi_l(M)G_{Sp,j}(M,M^0)d\tau_M+\frac{\sigma_{ja}}{\sigma_{ji}}\varphi_{l-1}^0(M^0)-\\
&-\frac{(\sigma_{ja}-\sigma_{jil})}{\sigma_{jil}2\pi}\oint_{Cl}G_{Sp,j}\frac{\partial\varphi_l}{\partial n}dc=\varphi(M^0),M^0\in S_{Cl}\\
&\frac{\sigma_{ji}l(k_{1jil}^2-k_{1j}^2)}{\sigma(M^0)2\pi}\iint_{Scl}\varphi_l(M)G_{Sp,j}(M,M^0)d\tau_M+\varphi_{l-1}^0(M^0)-\\
&-\frac{(\sigma_{ja}-\sigma_{ji}l)}{\sigma(M^0)2\pi}\oint_{Cl}G_{Sp,j}\frac{\partial\varphi_l}{\partial n}dc=\varphi_l(M^0),M^0\in S_{Cl}
\end{aligned}\qquad(3)$$

Если при переходе на следующий иерархический уровень ось двухмерности не меняется, а меняются только геометрии сечений вложенных структур, то аналогично (1,2) можно описать итерационный процесс моделирования сейсмического поля (случай формирования только продольной волны). Итерационный процесс относится к моделированию вектора смещений при переходе с предыдущего иерархического уровня на последующий уровень. Внутри каждого иерархического уровня интегро-дифференциальное уравнение и интегро-дифференциальное представление вычисляются с помощью алгоритмов (3). Если на некотором иерархическом уровне структура локальной неоднородности распадается на несколько неоднородностей, то двойной и контурные интегралы в выражениях (3) берутся по всем неоднородностям. В данном алгоритме рассмотрен случай, когда физические свойства неоднородностей одного и того же уровня одинаковы, различаются только границы областей.

Моделирование дифракции упругой поперечной волны на двумерной неоднородности иерархического типа в *N*- слойной среде

Аналогично (3) выписывается такой же процесс для моделирования распространения упругой поперечной волны в *N*-слойной среде с двумерной иерархической структурой произвольной морфологии сечения с использованием интегральных соотношений, выписанных в работе [2]**.**

$$\frac{(k_{2\,jil}^2 - k_{2\,j}^2)}{2\pi} \iint\limits_{SCl_l} u_{xl}(M) G_{Ss,j}(M, M^0) d\tau_M + \frac{\mu_{ja}}{\mu_{jil}} u^0_{x(l-1)}(M^0) +$$
$$+ \frac{(\mu_{ja} - \mu_{jil})}{\mu_{jil} 2\pi} \oint\limits_{Cl} u_{xl}(M) \frac{\partial G_{Ss,j}}{\partial n} dc = u_{xl}(M^0), M^0 \in S_{Cl} \qquad (4)$$
$$\frac{\mu_{jil}(k_{2\,jil}^2 - k_{2\,j}^2)}{\mu(M^0) 2\pi} \iint\limits_{SCl_l} u_{xl}(M) G_{Ss,j}(M, M^0) d\tau_M + u^0_{x(l-1)}(M^0) +$$
$$+ \frac{(\mu_{ja} - \mu_{jil})}{\mu(M^0) 2\pi} \oint\limits_{Cl} u_{xl}(M) \frac{\partial G_{Ss,j}}{\partial n} dc = u_{xl}(M^0), M^0 \in S_{Cl}$$

где $G_{Ss,j}(M, M^0)$ – функция источника сейсмического поля рассматриваемой задачи. Она совпадает с функцией Грина, выписанной в работе [2] для соответствующей задачи. $k_{2\,jil}^2 = \omega^2(\sigma_{jil} / \mu_{jil})$ – волновое число для поперечной волны, μ – постоянная Ламэ, u_{xl} – составляющая вектора смещений, l=1…L – номер иерархического уровня, u^0_{xl} – составляющая вектора смещений сейсмического поля в слоистой среде в отсутствие неоднородности предыдущего ранга, если l=2…L $u^0_{xl} = u_{x(l-1)}$, если l=1, $u^0_{xl} = u^0_x$, что совпадает с соответствующим выражением для нормального поля в работе [2].

Таким образом, итерационные процессы (3) и (4) позволяют определить при заданных модулях упругости во вмещающей иерархическую неоднородность слоистой среде и в неоднородности пространственное распределение составляющих сейсмического поля на каждом иерархическом уровне. Затем по известным формулам работы [3] для каждого иерархического уровня можно вычислить распределение составляющих тензора деформации и тензора напряжений по распределению составляющих вектора смещений. Эта информация играет важную роль при оценке состояния среды в зависимости от структуры ее иерархичности и степени ее изменчивости.

К вопросу об обратной задаче электромагнитного и акустического мониторинга в иерархической геологической среды.

Решение обратных задач имеет огромное значение в частности для нефтяной промышленности, поскольку нефтяной пласт относится к числу природных систем, не поддающихся прямым измерениям и наблюдениям в целом. Исследования последних лет показали, что в эволюции динамических систем играют неустойчивости, природу которых изучает теория самоорганизации или синергетика. Информацию об их проявлении в нефтяном пласте при его отработке можно только получить, используя данные мониторинга, чувствительные к его иерархической структуре.

В работе [1] предложена концепция поэтапной интерпретации переменного электромагнитного поля. На первом этапе определяются параметры нормального разреза, или параметры вмещающей одномерной немагнитной среды аномальные проводящие, либо магнитные включения. На втором этапе осуществляется подбор аномального переменного электромагнитного поля системой сингулярных источников, помещенных в горизонтально-слоистую среду с определенными на первом этапе геоэлектрическими параметрами. На третьем этапе решается теоретическая обратная задача, т.е. при заданных геоэлектрических параметрах вмещающей среды для набора параметров неоднородностей определяются контуры этой неоднородности. Получены явные интегро-дифференциальные уравнения теоретической обратной задачи рассеяния двумерного и трехмерного переменного и

трехмерного стационарного электромагнитных полей в рамках моделей: проводящее, либо магнитное тело в ν-ом слое проводящего n-слойного полупространства. В настоящей работе, используя подход, изложенный в работах [4,5], разработан алгоритм получения уравнения теоретической обратной задачи для переменного электромагнитного поля (скалярный случай) и акустического поля (поперечной и продольной акустической волны) для модели проводящая или упругая иерархическая неоднородность l-го ранга, расположенная в ν-ом слое проводящего, либо упругого n-слойного полупространства.

E-поляризация:

$$2\pi E_x^+(M_0) = \int_{\partial Dl}((E_{xv}^+(M) + E_{xv}^{1(l-1)}(M))(\frac{\partial G_E^{al}(M,M_0)}{\partial n} - \frac{\partial G_E(M,M_0)}{\partial n}) -$$
$$-(\frac{\partial E_{xv}^+}{\partial n} + \frac{\partial E_{xv}^{1(l-1)}}{\partial n})(G_E^{al}(M,M_0) - G_E(M,M_0)))dl_l; \quad (5)$$

H-поляризация:

$$2\pi H_x^+(M_0) = \int_{\partial Dl}((H_{xv}^+(M) + H_{xv}^{1(l-1)}(M))(\frac{\partial G_H^{al}(M,M_0)}{\partial n} - (\frac{k_i^2}{k_v^2}\frac{\partial G_H(M,M_0)}{\partial n}) -$$
$$-\frac{1}{k_v^2}(\frac{\partial H_{xv}^+}{\partial n} + \frac{\partial H_{xv}^{1(l-1)}}{\partial n})(k_{al}^2 G_H^{al}(M,M_0) - k_i^2 G_H(M,M_0)))dl_l; \quad (6)$$

2-D-дифракция звука

$$2\pi\varphi^+(M_0) = \int_{\partial Dl}((\varphi_v^+(M) + \varphi_v^{1(l-1)}(M))(\frac{\sigma_v}{\sigma_{al}}\frac{\partial G_{SP}^{al}(M,M_0)}{\partial n} - (\sigma_v/\sigma_i)\frac{\partial G_{SP}(M,M_0)}{\partial n}) -$$
$$-(\frac{\partial\varphi_v^+}{\partial n} + \frac{\partial\varphi_v^{1(l-1)}}{\partial n})(G_{SP}^{al}(M,M_0) - (\sigma_v/\sigma_i)G_{SP}(M,M_0)))dl_l; \quad (7)$$

2-D- линейно поляризованная (поперечная) волна

$$2\pi u_x^+(M_0) = \int_{\partial Dl}((u_{xv}^+(M) + u_{xv}^{1(l-1)}(M))(\frac{\partial G_{SS}^{al}(M,M_0)}{\partial n} - (\mu_v/\mu_i)\frac{\partial G_{SS}(M,M_0)}{\partial n}) -$$
$$-\mu_v(\frac{\partial u_{xv}^+}{\partial n} + \frac{\partial u_{xv}^{1(l-1)}}{\partial n})((1/\mu_{al})G_{SS}^{al}(M,M_0) - (1/\mu_i)G_{SS}(M,M_0)))dl_l; \quad (8)$$

В уравнениях (7 и 8) σ – плотность, μ – параметр Ламе, в уравнениях (5-8) G^{al} функция Грина для внутренности иерархической неоднородности l-го ранга соответственно для каждой задачи [1].

Список литературы:

1. *Хачай, О.А.* Математическое моделирование и интерпретация переменного электромагнитного поля в неоднородной коре и верхней мантии Земли // Докторская диссертация. Свердловск: ИГФ УрО РАН. − 1994. – 314 с.

2. *Хачай, О.А., Хачай, А.Ю.* О комплексировании сейсмических и электромагнитных активных методов для картирования и мониторинга состояния двумерных неоднородностей в N-слойной среде // Вестник ЮУРГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2011. −№ 2(219). − С. 49-56.

3. *Лурье, А.И.* Пространственные задачи теории упругости – М.: Гос. Изд. - во технико-теоретической литературы. – 1956. – 435 с.

4. *Хачай, О.А.* Об интерпретации двумерных переменных и трехмерных стационарных аномалий электромагнитного поля // Изв. АН СССР, Физика Земли. −1989. −№10. −С.50−58.

5. *Хачай, О.А.* О решении обратной задачи для трехмерных переменных электромагнитных полей // Изв. АН СССР, Физика Земли. −1990. −№2. – С.55−59.

УДК 550.830, 539.3

ИНФОРМАТИВНЫЕ ПРИЗНАКИ ПОДГОТОВКИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПО ДАННЫМ ШАХТНОГО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА.

О.А. Хачай, *olgakhachay@yandex.ru, Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*
О.Ю. Хачай, *khachay@yandex.ru, Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия*
В.К. Климко, *klimko_vk@nkmk.ru,Таштагольский филиал ОАО ЕВРАЗРУДА, Таштагол,Россия*
О.В. Шипеев, *shipeev_ov@nkmk.ru, Таштагольский филиал ОАО ЕВРАЗРУДА, Таштагол,Россия*

Аннотация

Цель и задачи. Для создания динамической модели, адекватной процессам подготовки высокоэнергетических проявлений в горных массивах, находящихся под сильным техногенным воздействием, был произведен анализ данных детального сейсмического каталога Таштагольского подземного рудника. В результате анализа методом фазовых диаграмм было выявлено, что имеют место два взаимозависящих друг от друга процесса: процесс накопления энергии, что отражается в области, притягивающей фазовые траектории, и процесс резонансного сброса накопленной энергии. После этого сброса система возвращается снова в эту же притягивающую фазовые траектории область. Это подтверждается и детальным анализом фазовых траекторий сейсмического отклика массива до и после самого сильного горного удара. Однако на процесс изменения состояния массива сильно влияет процесс достаточно регулярного внешнего воздействия в виде взрывов различной мощности. За время между взрывами массив не успевает выделить полученную им энергию, что приводит к реакции запаздывания отклика и нелинейности его проявления, что затрудняет прогноз по времени сильно энергетического разрушительного события.

Методы. Исходя из идей, высказанных Опариным В.Н. и др., анализируемая база данных была дополнена данными пространственных координат взрывов. На этой основе был разработан новый алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога с учетом кинематических и динамических характеристик деформационных волн, распространяющихся с разными скоростями в массиве горных пород, находящегося под интенсивным внешним воздействием в виде массовых или технологических взрывов.

Результаты. Было установлено, что волны, распространяющиеся со скоростями от 10 до 1 м/час, являются преимущественным переносчиком энергии в массиве и способствующими ее выделению. События, происходящие в массиве с этими скоростями и обладающие энергией выделения меньше, чем 10^4 джоуля, способствуют криповой перестройке иерархических включений блоковых частей массива, которая приводит к организации нового участка динамической неустойчивости. События, происходящие в массиве с этими скоростями и обладающие энергией выделения больше, чем 10^5 джоуля, могут быть использованы как предвестники и которые рекомендуется принимать во внимание при корректировке произведения взрывов в той или иной части массива. Полное отсутствие этих событий свидетельствует об увеличении напряженного состояния в массиве шахты в целом.

Практическое значение и выводы. Разработанный новый алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога позволяет извлечь дополнительную важную информацию для прогноза опасных явлений в рудных шахтах и для развития теории динамических явлений в натурных геолого-геофизических средах.

Ключевые слова: отклик массива, сейсмический шахтный каталог, анализ натурных данных, алгоритм обработки сейсмологической информации, время подготовки горных ударов, объем очага.

INFORMATIVE ATTRIBUTES OF PREPARING HIGH ENERGETIC DYNAMICAL EVENTS ACCORDING TO DATA FROM THE MINING SEISMOLOGICAL MONITORING.

***O.A. Hachay**, olgakhachay@yandex.ru, Institute of Geophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia*
***O.Y. Khachay**, khachay@yandex.ru, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia*
***V.K. Klimko**, klimko_vk@nkmk.ru, Tashtagol branch of OAO EVRAZRUDA, Tashtagol, Russia*
***O.V. Shipeev**, shipeev_ov@nkmk.ru, Tashtagol branch of OAO EVRAZRUDA, Tashtagol, Russia*

Purpose. For developing the dynamical model, which will correspond adequately to the processes of preparation high energetic events in rock massive, that are under strong technogenic influence, it had been provided an analysis of the detailed seismic catalogue of the Tashtagol mine. As a result of the analysis, using the method of phase diagrams we had revealed, that there exist two interrelated processes: a process of energy accumulation, that is reflected by the area, that attracts the phase trajectories, and the process of resonant reset of the accumulated energy. After that reset the system returns again to the same area, that attracts the phase trajectories. That is confirmed by the detailed analysis of the phase trajectories of the massif seismic response before and after the strongest rock burst. But on the process of massif state change the regular outer influence as explosions of different power strong influences. During the time between the explosions the massif cannot release the received energy, that leads to the lag reaction of the response and nonlinear its behavior, that disturbs the time prediction of the strong energetic destructive event.

Design/methodology/approach. According to ideas of Oparin et al., the data base was added by information of explosions coordinates. Using that full data base it was developed a new algorithm of seismological information processing from the detailed mines catalogue with account of kinematic and dynamic characteristics of deformation waves that propagate with different velocities in the rock massif that is under the intense outer influence in the form of mass or technological explosions

Findings. It was defined that the waves that propagate with the velocities from10 up to 1 m/hour, are the preferred energy carriers in the massif and facilitate to its releasing. The events that occur in the massif with these velocities and have releasing energy less, than 10^4 joules promote creep restructuring of the hierarchic inclusions into the block massif parts, that lead to organization a new place of dynamical no stability. The events that occur in the massif with these velocities and have the releasing energy more, than 10^5 joules, can be regarded as precursory and that is recommended to take into account by change of explosions providing in the located massif parts. The whole absence of these events testifies the increase of stressed state in the mines massif state as a whole.

Practical value/implications. The developed new algorithm of seismological information processing of the detailed mine catalogue allows to extract an additional significant information for forecast dangerous events in rock mines and for development the theory of dynamical events in natural geological-geophysical media.

Keywords: massif response, seismological mining catalogue, analyze of observed data, algorithm of seismological information processing, informative attributes, time of preparing rock bursts, focus volume.

Алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога для определения информативных признаков подготовки высокоэнергетических динамических явлений, обсуждение результатов

В настоящей работе предприняты количественные оценки параметра запаздывания высокоэнергетического отклика массива на ряд техногенного воздействия, во время которого значительную часть времени составляло отсутствие отклика массива. Толчок (ю36) с энергией 8.14E+08 дж. произошел 25.11.2007г. с координатами x=11928м, y=11627м, z=-264м(+(-450м)). Он обозначен, как и все остальные нами изучаемые отклики, происшедшие в южной части шахты буквой ю и номером 36. Взрывы обозначены в виде (i), где i-номер взрыва за период 2006-2008гг. Нами получены дополнительные оценки расстояний от точки

взрыва до точки отклика массива. Координаты взрывов и откликов массива взяты из сейсмического шахтного каталога Таштагольского рудника.

Таблица 1. Воздействие и отклик массива южной части шахты в пределах расстояния от 0 до 50м от точек взрывов.

В-О	dx(м)	dy(м)	dz(м)	r(м)	dt(сутки)	Ев(дж)	Ео(дж)
(1)-ю1	0	-23	10	25	77	5.40E+04	2.7E+06
(1)-ю2	-18	-1	3	18	111	5.40E+04	1.48E+04
(23)-ю7	-24	-16	3	29	0.3	2.15E+07	1.56E+04
ю10-ю17	-20	17	-18	32	40	1.17E+04	1.56E+04
ю10-ю18	-21	-31	-13	40	48	1.17E+04	1.56E+04
(38)-ю17	-30	-24	-1	38	28	7.97E+03	1.56E+04
(46)-ю21	-25	11	3	27	2	9.52E+07	7.48E+04
ю31-ю32	1	-2	-3	4	0.3	1.10E+04	1.04E+04

Обозначения в таблице 1: В-воздействие, о-отклик, *dx*,*dy*,*dz*-разность декартовых координат точек воздействия и отклика, $r = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$ - расстояние между точкой воздействия и отклика, *dt*-разность моментов воздействия и отклика, время запаздывания отклика, *Ев*-энергия воздействия, *Ео*-энергия отклика.

Таблица 2. Воздействие и отклик массива южной части шахты в пределах расстояния от 50 до100м от точек взрывов.

В-О	dx(м)	dy(м)	dz(м)	r(м)	dt(сутки)	Ев(дж)	Ео(дж)
(23)-ю5	-56	-34	28	71	0.03	2.15E+07	1.24E+04
(30)-ю9	55	13	-13	58	18	6.35E+06	1.65E+04
(34)-ю10	43	-49	-58	87	2	2.44E+04	1.17E+04
(38)-ю11	4	-41	41	58	15	7.97E+03	1.04E+04
(38)-ю18	-31	-72	4	78	36	7.97E+03	1.17E+04
ю11-ю16	26	62	6	67	11	1.04E+04	1.10E+04
(42)-ю13	24	-24	-59	68	0.02	1.19E+09	4.04E+04
ю15-ю19	75	60	18	98	22	2.92E+04	2.44E+04
ю23-ю28	-7	-62	-39	74	138	2.92E+04	1.16E+04
ю25-ю27	42	42	-40	72	38	3.74E+04	4.04E+04
(72)-ю34	72	54	22	93	42	1.80E+06	8.68E+04
(78)-ю35	97	18	7	99	0.1	8.68E+04	2.67E+04

Обозначения в таблице 2 те же, что и в таблице 1.

Таблица 3. Воздействие и отклик массива южной части шахты в пределах расстояния от 100 до150м от точек взрывов.

В-О	dx(м)	dy(м)	dz(м)	r(м)	dt(сутки)	Ев(дж)	Ео(дж)
(16')-ю36	111	97	-22	149	575	1.24E+04	8.14E+08
(21)-ю36	117	53	-34	133	539	1.65E+04	8.14E+08
(23)-ю4	69	-82	19	109	0.01	2.15E+07	1.92E+04
(23)-ю8	-28	-121	-2	124	0.06	2.15E+07	3.74E+04
(35)-ю36	118	61	34	137	400	1.92E+04	8.14E+08
(38)-ю36	77	86	-18	117	393	7.97E+03	8.14E+08
(39)-ю36	100	45	33	114	392	2.07E+06	8.14E+08
(41)-ю36	102	74	41	132	378	3.95E+06	8.14E+08
ю4-ю5	-125	48	9	134	0.03	1.92E+04	1.24E+04
ю5-ю6	-35	-118	-13	124	0.96	1.24E+04	3.35E+05
ю7-ю8	4	-105	5	105	0.09	1.04E+04	3.74 E+04

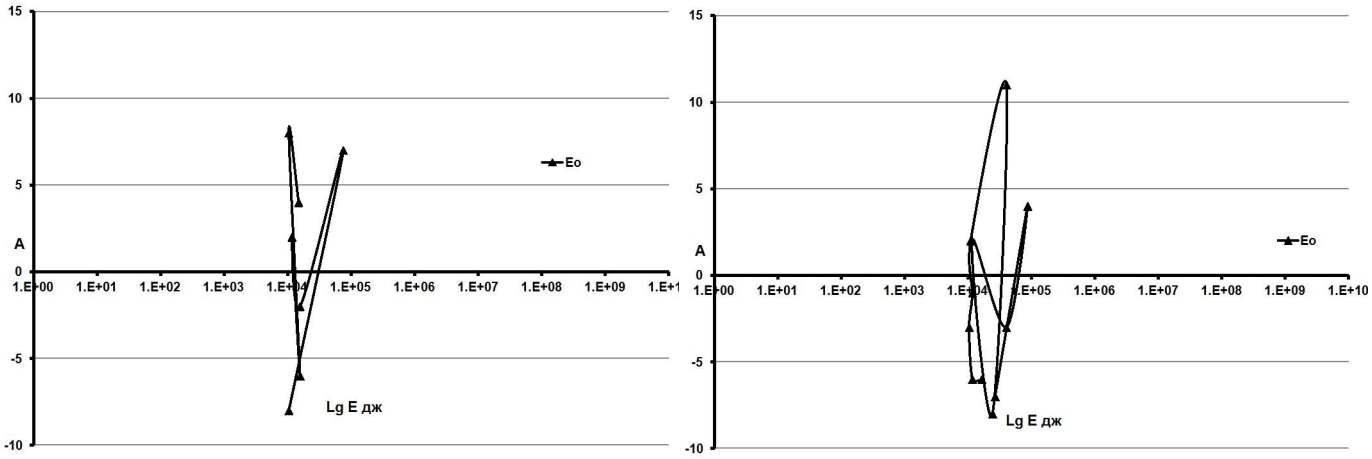
ю20-ю21	-95	-28	-81	128	1	6.60E+04	7.48 E+04
(43)-ю18	13	-88	-46	100	7	1.55E+06	1.17 E+04
(43)-ю36	121	70	24	142	364	1.55E+06	8.14 E+08
(44)-ю18	32	-108	17	114	0.08	3.98 E+06	1.17 E+04
(68)-ю33	31	-137	-20	142	70	2.70 E+06	3.48 E+05
(68)-ю36	89	70	34	118	70	2.70 E+06	8.14 E+08
(70)-ю34	106	33	17	112	56	2.06 E+06	8.68 E+04
(71)-ю36	63	75	48	109	49	1.65 E+05	8.14 E+08
(72)-ю36	55	91	39	113	42	1.80 E+06	8.14 E+08
(78)-ю36	80	55	44	107	0.06	8.68 E+04	8.14 E+08

Обозначения в таблице 3 те же, что и в таблице 1.

Таблица 4. Воздействие и отклик массива южной части шахты в пределах расстояния от 150 до 200м от точек взрывов.

В-О	dx(м)	dy(м)	dz(м)	r(м)	dt(сутки)	Ев(дж)	Ео(дж)
(23)-ю6	-91	-152	15	178	1	2.154E+07	3.35E+05
(29)-ю36	170	91	-23	194	434	2.07E+06	8.14E+08
(30)-ю36	174	76	2	190	427	6.35E+06	8.14E+08
(34)-ю36	130	78	23	153	407	2.44E+04	8.14E+08
(40)-ю36	140	63	17	154	385	2.70E+06	8.14E+08
ю4-ю6	-160	-70	4	175	.99	1.92E+04	3.35E+05
ю20-ю37	38	-146	14	152	336	3.35E+05	6.39E+04
(42)-ю14	-78	-180	26	198	.06	1.19E+09	1.92E+04
(42)-ю15	163	-38	-31	170	2	1.19E+09	2.92E+04
ю13-ю15	187	-14	-28	190	2	1.48E+04	2.92E+04
(44)-ю36	140	50	50	157	357	3.98E+06	8.14 E+08
(46)-ю36	140	64	-17	155	336	9.52E+07	8.14 E+08
(59)-ю36	115	117	1	164	197	1.10E+04	8.14 E+08
(74)-ю36	98	111	-54	158	35	2.93 E+06	8.14 E+08
(78)-ю33	1	-168	58	178	.01	8.68 E+04	3.48 E+05

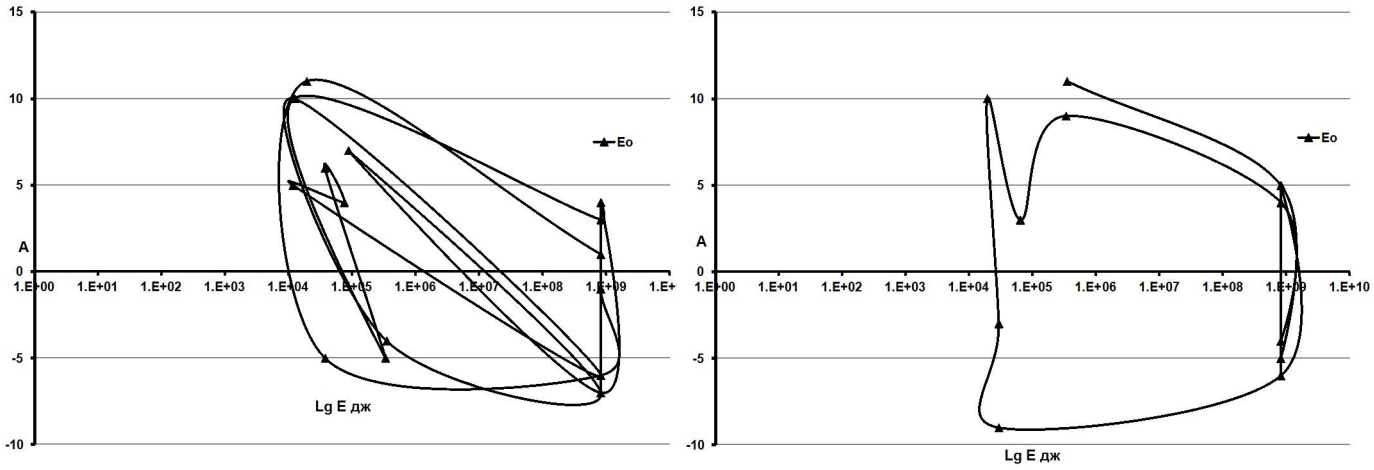
Обозначения в таблице 4 те же, что и в таблице 1.



а б

Для визуализации изменения состояния массива при подготовке высокоэнергетического явления в рамках этих градаций используется метод фазовых диаграмм [1]. Данные, представленные в таблицах 1-4, являются результатом применения разработанного алгоритма обработки данных, представленных в сейсмологическом шахтном

каталоге за период с 2006 по 2008гг. Введены градации состояния массива по расстояниям между точками взрывов и точками отклика массива: 0-50м, 50-100м, 100-150м, 150-200м.



в г

Рис.1. Фазовые диаграммы динамического состояния массива южной части шахтного массива за период 2006-2008гг. а) *r*=0-50м; б) *r*=50-100м; в) *r*=100-150м; г) *r*= 150-200м.

Обозначения: вертикальная ось: A=$aLgf$, $f = \left|\frac{\partial E_V}{\partial t}\right|$, $a=sign\ \partial E_V$,

$E_V = E_в - E_o$,горизонтальная ось: $LgE=LgEo$

Выводы. Как следует из анализа данных таблиц 1-4 и рис.1(а-г) отклик массива ю36 в виде высокоэнергетического отклика проявляется только, начиная с расстояний между точкой воздействия и отклика от 100м до 200м. При этом время запаздывания реакции массива на оказанное в виде взрыва воздействие составляет десятки и даже сотни суток. Поэтому, несмотря на то, что от взрыва (78) (таблица 3) отклик ю36 произошел практически мгновенно, ему предшествовал длинный процесс подготовки резонансного выброса энергии [2], который необходимо сопровождать электромагнитным мониторингом возникновения и скопления дезинтеграционных зон в объеме массива: *dx=100-180м, dy=33-180м, z=* (-210-(-300))+(-450)м.

Разработанный новый алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога позволяет извлечь дополнительную важную информацию для прогноза опасных явлений в рудных шахтах и для развития теории динамических явлений в натурных геолого-геофизических средах.

Работа выполнена в рамках ПП с СО РАН 2012-2014.

Список литературы:

1. *Чуличков, А. И.* Математические модели нелинейной динамики. – М.: Физматлит. – 2003. – 294 С.

2. *Хачай, О. А., Хачай О.Ю.*Сопоставление особенностей синергетических свойств состояния удароопасного массива горных пород, определяемых по данным сейсмического и индукционного электромагнитного мониторинга. // Мониторинг. Наука и технологии. – 2014. –№3– С.50-55.

УДК 550.361

МЕХАНИЗМЫ КОНВЕКЦИИ В РАСТУЩЕМ ЯДРЕ ЗЕМЛИ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЕ В ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ ЗЕМНЫХ МЕТЕОРИТОВ

***Ю.В. Хачай**, yu-khachay@yandex.ru*
Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича, Екатеринбург, Россия;
***В.Н. Анфилогов**, Anfilogov@mineralgy.ru*
Институт минералогии УрО РАН, Миасс, Россия
***А.Н. Антипин**, anantipin@rambler.ru*
Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича, Екатеринбург, Россия

Аннотация. На основе численного моделирования аккумуляции ядра Земли за счет случайного выпадения тел и частиц получены варианты распределения температуры в растущей планете. Показано, что при росте ядра трижды происходит смена механизмов конвекции. Только с образованием внешнего ядра реализуется механизм конвекции , создающий МГД –динамо генерации геомагнитного поля. Получены оценки возраста магнитных включений в метеоритах земного происхождения, которые несут свидетельство о происхождении намагнитившего их поля.

CONVECTION MECHANISMS IN THE GROWING EARTH'S CURE AND THEIR APPEARANCE IN THE RESIDUAL MAGNETIZATION OF EARTH"S ORIGIN METEORITES

***Y.V. Khachay**, yu-khachay@yandex.ru*
Institute of Geophysics, named after Y.P. Bulashevitch, Ekaterinburg, Russia
***V.N. Anfilogov** Anfilogov@mineralgy.ru*
Institute of mineralogy UB RAS, Miass, Russia
***A.N. Antipin**, anantipin@rambler.ru*
Institute of Geophysics, named after Y.P. Bulashevitch, Ekaterinburg, Russia

Abstract. On the base of numerical modeling of Earth's core accumulation due to random loss bodies and particles we had obtained variants of temperature distribution in the growing planet. It is shown that by growing of the core threefold can be occurred the change of convection mechanisms. Only with forming the outer core the convection mechanism is realized, that is forming the MHD-dynamo generation of the geomagnetic field. It had been obtained the age's estimations of magnetic inclusions in meteorites of Earth's origin that bear witness to the origin of their magnetized field.

Конвекция в ядре Земли обеспечивает основной тепло-массо перенос в формирующейся планете, способствует изменени химического состава внутренних областей, формирует условия генерации геомагнитного поля. Впервые обоснования изменения режимов конвекции в процессе аккумуляции ядра Земли были специально отмечены в работе [1] . Причина смены режимов конвекции состоит в изменении вклада различных источников внутренней энергии На начальном этапе аккумуляции основным источником внутренней энергии планеты является выделение тепла за счет распада короткоживущих радиоактивных элементов и прежде всего Al^{26} [2]. На рис. 2 это область от центра Земли до точки А . На этом интервале массы протопланеты выделение тепла при выпадении аккумулируемых тел еще мало. Поэтому температура расплавленной центральной части выше температуры поверхности. Реализуются условия стандартной конвекции Релея-Бенара. Однако, масса тела еще мала, поэтому мало значение гравитационного ускорения и низка интенсивность конвективного течения. Это является причиной отсутствия МГД-механизма генерации собственного магнитного поля. Поэтому в древнейших магнитных включениях в земных метеоритов возраста 4,567 -4.577 млрд.л. могла сохраниться только остаточная намагниченность, вызванная древним межпланетным магнитным полем. В интервале значений радиуса протопанеты, соответствующем промежутку А-В на рис.2 увеличение

массы протопланеты происходило очень быстро. При падении тел и частиц из протопланетного облака происходило такое мощное выделение кинетической энергии, что, как позволили установить результаты численного моделирования [3], температура на верхней поверхности формирующегося ядра намного превышала температуру на ее нижней границе. Поскольку состав вещества, формирующего растущее ядро на этом этапе аккумуляции планеты остается преимущественно железным [3], то реализуется механизм тепловой конвекции при подогреве сверху. Механизм МГД-генерации стационарного магнитного поля при таком режиме конвекции не возможен. Прямым свидетельством этого заключения может служить отсутствие образцов земного происхождения с остаточной намагниченностью в интервале возрастов 4,577-4,6 млрд лет.

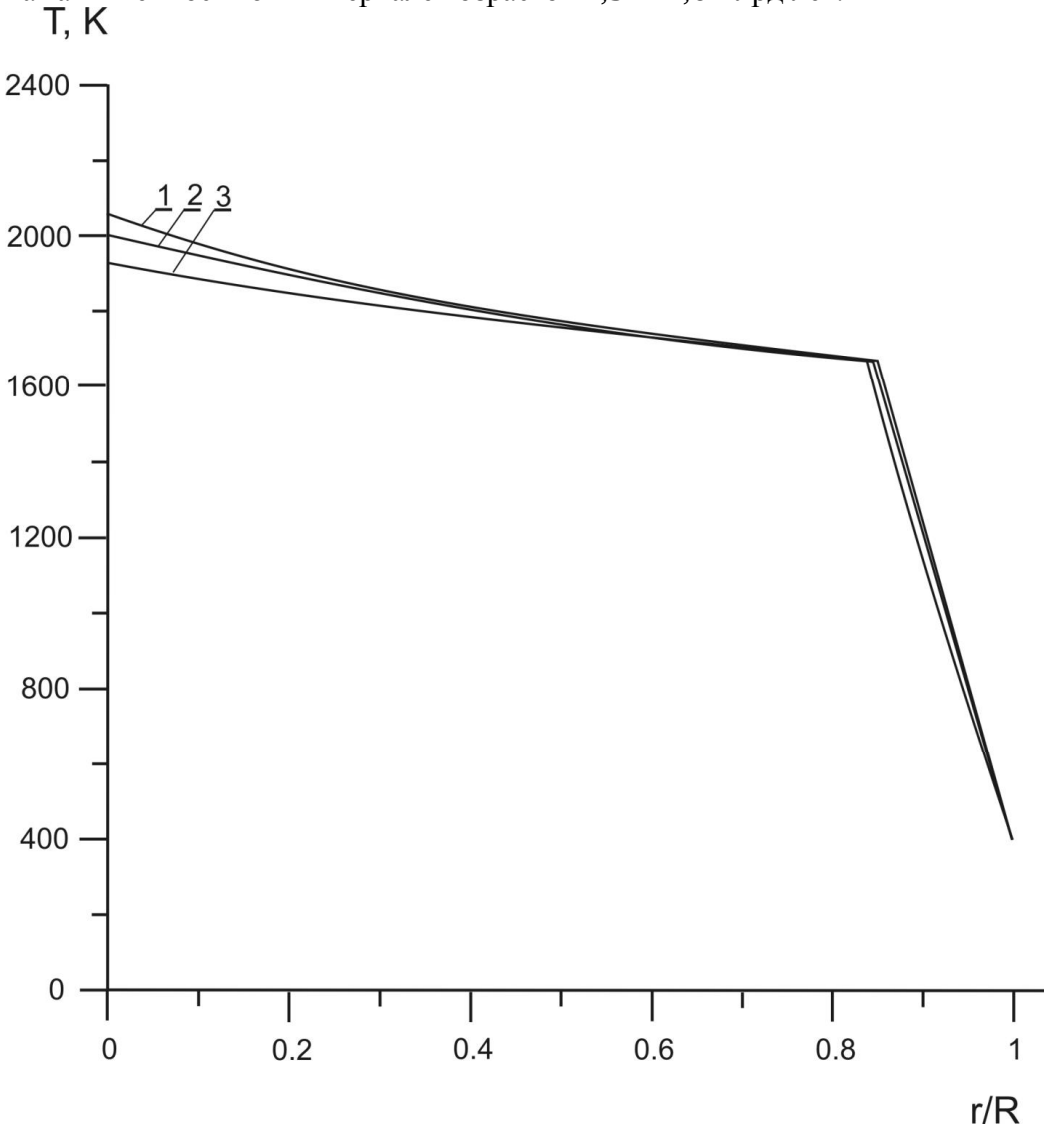


Рис. 1. Варианты распределения температуры на ранней стадии аккумуляции ядра Земли Радиус протопланеты R для кривой 1 R= 400км, для кривой 2 R= 300км, для кривой 3 R=259км.

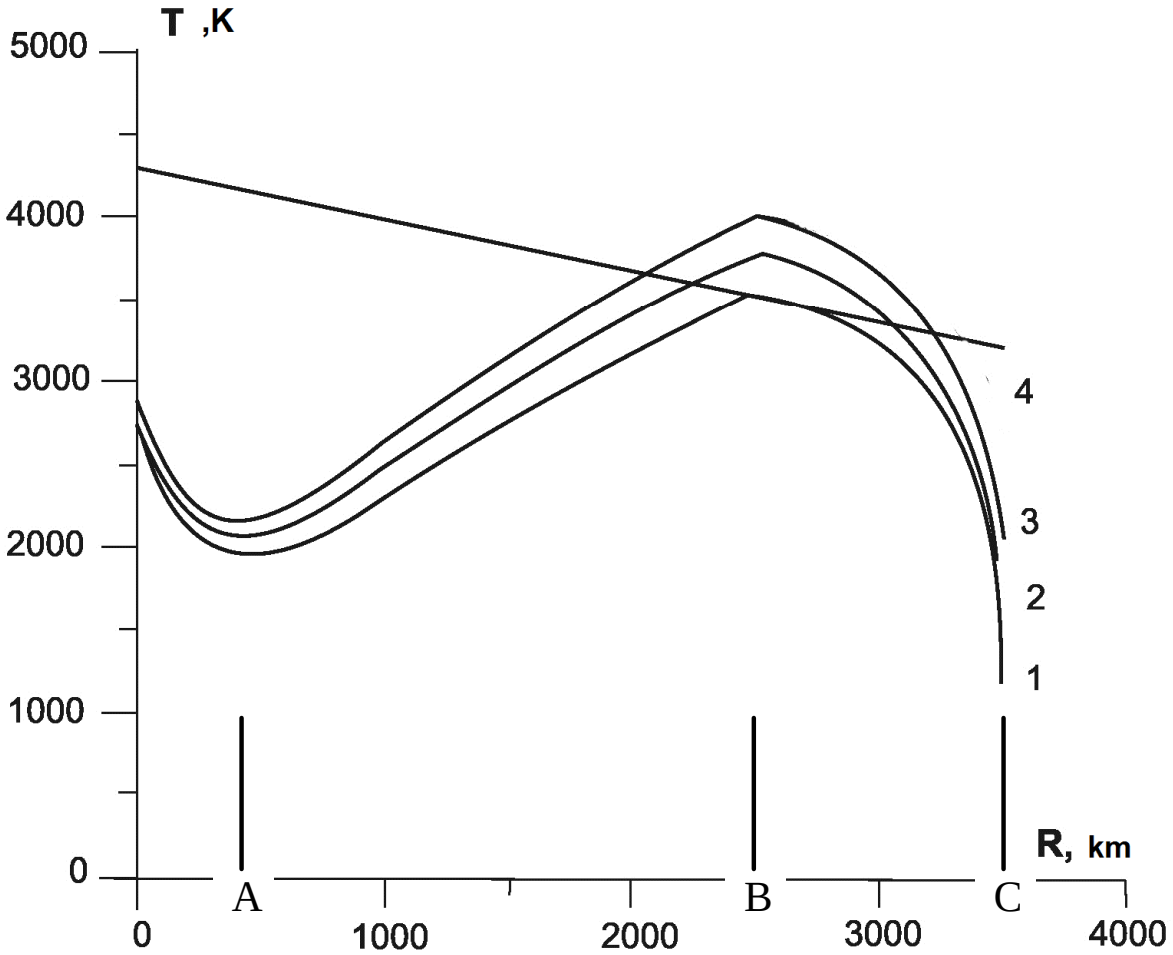


Рис. 2 Вариант распределения начальной температуры в растущем ядре Земли при различном значении коэффициента k ,характеризующего долю потенциальной энергии, преобразуемой во время соударения в тепловую: для кривой 1 =0,2; для кривой 2 k=0,3, для кривой 3 k=0,4.Кривая 4 аппроксимирует распределение темпера туры плавления в современном ядре [3].

Наконец, в интервале значений радиуса планеты из промежутка B-C рис.2. масса растущей планеты становится уже достаточной для гравитационного удержания силикатной твердой части ударников [3]. Соударения становятся более упругими и меньшая часть кинетической энергии соударения тел переходит в тепло. Это приводит к снижению температуры растущей поверхности протопланеты и значения температуры на нижней поверхности слоя расплава становятся больше, чем на верхней. Однако, здесь имеются существенные отличая от классического механизма Релей-Бенаровской конвекции: 1) температура на верхней границе растущего тела не постоянна, а существенно изменяется от места и кинетической энергии падающих тел [3,4]. пример приведен на рис. 3. из [3], 2) в зависимости от скорости роста протопланеты, величины её угловой скорости тепловых свойств вещества. Эти поверхностные неоднородности температуры и состава, перекрываемые следующими порциями аккумулируемых тел, как показало численное моделирование на примере 3D-сектора растущей сферы для характерных условий Земли не подавляют механизма конвекции. Величины межпланетного магнитного поля оказывается достаточно для запуска МГД –процесса в формирующемся внешнем ядре Земли [5]. Поэтому появление включений в земных метеоритах, имеющих остаточную намагниченность старше 4,6 можно рассматривать как несомненное доказательство появления МГД-динамо в формирующемся внешнем ядре еще до окончания роста мантии и завершения аккумуляции Земли.

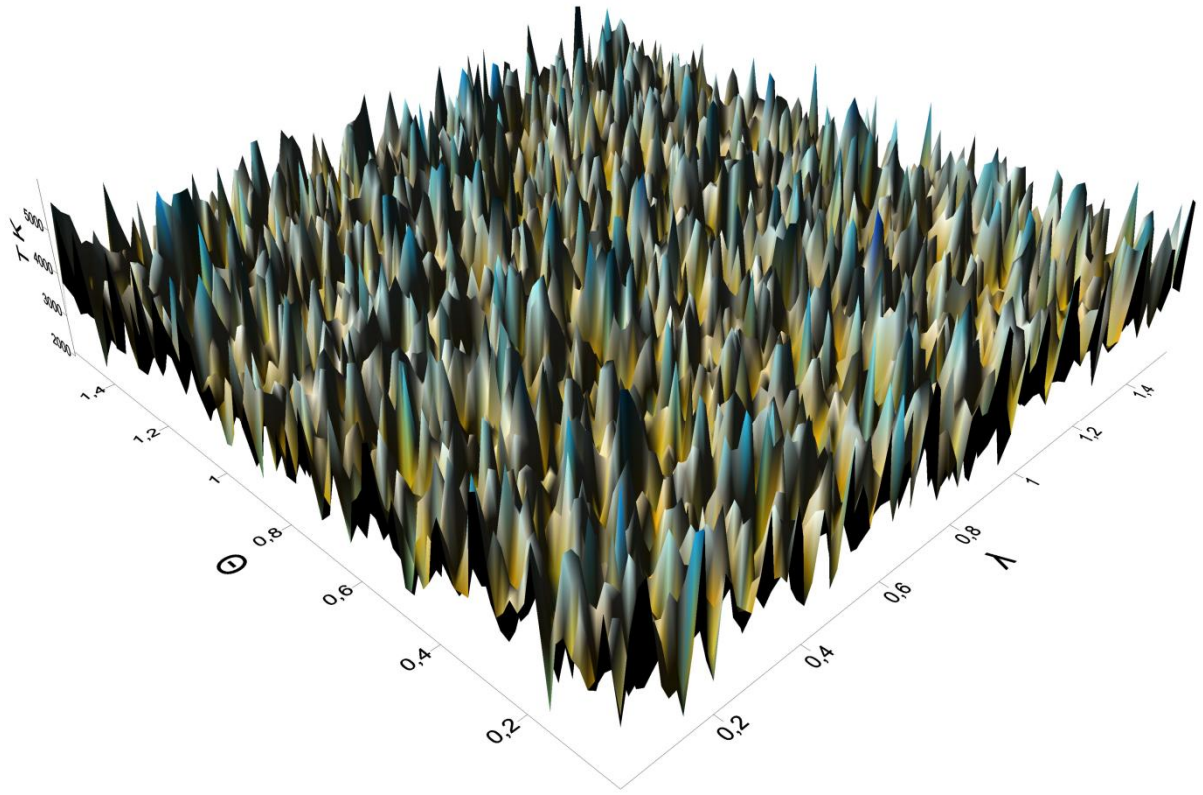


Рис.3.Вариант распределения температуры на поверхности растущего ядра при R= 1000км при случайном распределении тел и частиц по энергии соударения и по поверхности [3].
Работа выполнена при частичной поддержке фонда РФФИ № 13-05-00138.

Литература

1. Khachay Yu. Realization of thermal Convection into the initial Earth's Core on the Stage of planetary Accumulation // Geophysical Research Abstracts Vol. 17, EGU2015-2241, 2015 EGU General Assembly 2015
2. Анфилогов В.,Н.. Хачай Ю.В. Возможный вариант дифференциации вещества на начальном этапе формирования Земли // ДАН. 2005, т 403, № 6, с. 803-806.
3. Anfilogov V.,,Khachay Y. , Some Aspects of the Solar System Formation. SpringerBriefs of the Earth Sciences. 2015, -75p
4. Yu.V. Khachay MHD process in the layer of gravitating sphere growing radius // Magnetohydrodynamics. Vol. 49 (2013), N 1-3, 81-86.
5. Khachay Yu. Models of convection and the possibility of MHD process in the Earth's core at stage models of the planetary accumulation // Russifn conference on Magnetohilrodynamics. June 22 – 25, 2015. Russia..Book of abstracts p. 45
6.

УДК 550.8.05

БЫСТРОЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ С БАЗИСНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ХААРА ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЯ

Л.А. Христенко, Ю.И. Степанов, *liudmila.hristenko@yandex.ru*
Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

Было выполнено быстрое вейвлет–преобразование значений кажущихся сопротивлений ($\rho_к$). Кажущиеся сопротивления измеряли на профиле расположенном в пределах Верхнекамского месторождения солей. Преобразованные значения $\rho_к$ позволили уточнить пространственное положение комплексных аномалий.

FAST WAVELET TRANSFORM WITH BASIS FUNCTIONS OF HAAR AT INTERPRETING OF DATA ELECTRICAL PROFILING

L.A. Hristenko, Y.I. Stepanov, *liudmila.hristenko@yandex.ru*
Mining Institute of the Ural Branch Russian Academy of sciences, Perm, Russia

Fast wavelet transform values of apparent resistance (ρ_a) was made. The apparent resistance were measured on the profile that is located within the Verkhnekamskoye Deposit of salts. The converted values ρ_a have helped to clarify the spatial position of the complex anomalies.

Вейвлеты и основанные на них интегральные вейвлет–преобразования были предложены еще в начале 90-х годов 20-го века и в последующее время интенсивно развивались. Первый простейший тип вейвлета был описан Хааром еще в 1909 году. Практическое использование вейвлетов в настоящее время столь обширно, а результаты настолько впечатляющие, что это натолкнуло на предположение о возможности получения более содержательных результатов комплексной интерпретации данных электроразведки. Имеется достаточно успешный опыт использования вейвлет–анализа в задачах интерпретации геопотенциальных полей [1–4]. Вейвлеты помогают выявить и описать скрытые особенности сигнала, а во многих случаях дают весьма удобные для анализа представления сигнала (при различной детальности его рассмотрения).

Основополагающая идея многомасштабного вейвлет–представления сигналов заключается в разбивке имеющихся цифровых значений на две составляющие: "грубую" (аппроксимирующую) и "уточненную" (детализирующую), с последующей их детализацией итерационным методом. Для выполнения т.н. дискретного прямого и обратного вейвлет – преобразования с применением быстрых алгоритмов преобразований (БВП), используют короткие импульсы–вейвлеты, сконструированные на основе ортогональных базисных функций. Функции Хаара - простейшей пример ортогональных вейвлетов. При практическом анализе сигналов они (и их более сложные варианты) называются широкополосными и узкополосными фильтрами соответственно, потому что они отфильтровывают компоненты сигнала на больших и малых масштабах [5].

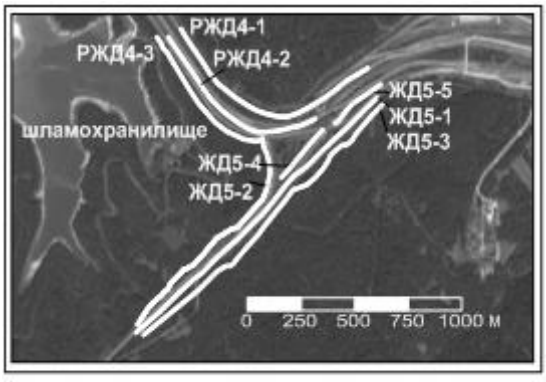


Рис.1. Профили наблюдений

Рассмотрим аспект преобразования данных полевых геофизических измерений, касающийся их упрощения, позволяющий отчетливее выделить скрытые закономерности изменения амплитуды физических полей. С помощью программы HAAR_2 [1] было выполнено быстрое вейвлет–преобразование дискретных значений кажущихся сопротивлений (КС) по профилю РЖД5-3, расположенному в пределах Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (рис.1). Программа реализует сжатие сигнала, представленного в виде значений амплитуд, с

использованием разложения в базисе Хаара. КС получены при выполнении наблюдений методом симметричного электропрофилирования на двух разносах питающей линии АВ — 110 и 210 м. Расчеты проводились для 2, 3, 4 и 5 уровней разложения сигнала при заданной погрешности аппроксимации наблюденных значений 1 и 2 Омм.

В результате наблюденные значения КС были разложены на две составляющие "сигнал" и "помеху" (с некоторой условностью). Расчеты при 5 уровнях разложения с погрешностью аппроксимации 2 Омм позволили получить предпочтительное для решения нашей задачи разложение сигнала (отбраковать сравнительно много мелких особенностей сигнала при сохранении его главных характеристик) (рис.2).

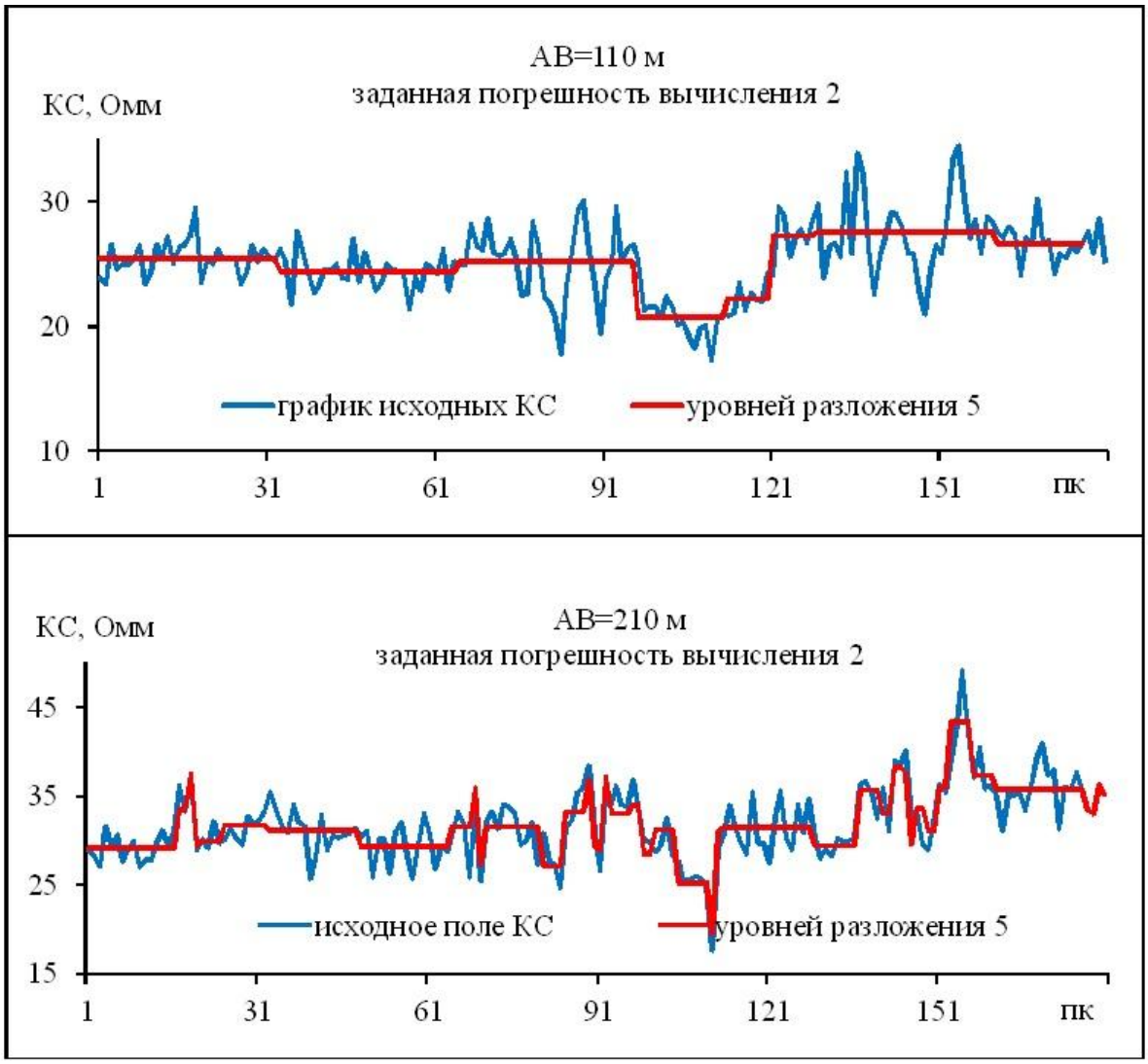


Рис.2. Быстрое вейвлет-преобразование с базисными функциями Хаара при 5 уровнях разложения. Профиль РЖД5-3

Ранее уже приводились результаты интерпретации данных ЕП и СЭП, выполненные с использованием безэталонных классификационных процедур программного комплекса Коскад [6]. Классификации подвергалось многопризнаковое пространство, включающее в себя сами наблюденные параметры U ЕП и КС, а также их статистические характеристики, вычисленные в скользящем окне.

После выполнения быстрого вейвлет–преобразования значений КС с базисными функциями Хаара, проводились повторные расчеты статистик для восстановленных значений КС. Было сформировано новое многопризнаковое пространство и выполнена процедура классификации методом динамических сгущений. В результате получены новые

контуры классов (геофизических аномалий) (рис.3). Совпадение этих контуров с результатами газогеохимического опробования позволяет предположить, что использование быстрого вейвлет–преобразования кажущихся сопротивлений позволило уточнить пространственное положение комплексных аномалий.

Ранее уже приводились результаты интерпретации данных ЕП и СЭП, выполненные с использованием безэталонных классификационных процедур программного комплекса Коскад [6]. Классификации подвергалось многопризнаковое пространство, включающее в себя сами наблюденные параметры U ЕП и КС, а также их статистические характеристики, вычисленные в скользящем окне.

После выполнения быстрого вейвлет–преобразования значений КС с базисными функциями Хаара, проводились повторные расчеты статистик для восстановленных значений КС. Было сформировано новое многопризнаковое пространство и выполнена процедура классификации методом динамических сгущений. В результате получены новые контуры классов (геофизических аномалий) (рис.3).

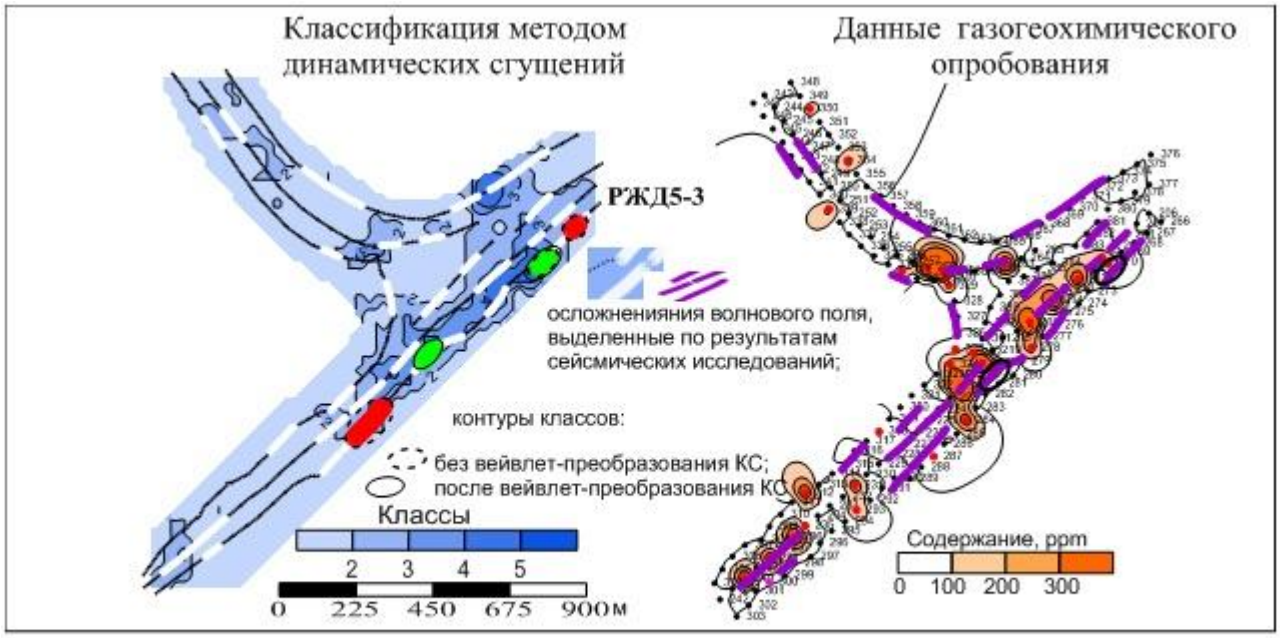


Рис.3. Результаты комплексной интерпретации по профилю РЖД5-3

Совпадение этих контуров с результатами газогеохимического опробования позволяет предположить, что использование быстрого вейвлет–преобразования кажущихся сопротивлений позволило уточнить пространственное положение комплексных аномалий [7–9].

Список литературы:

1. Долгаль А.С. Использование быстрого вейвлет-преобразования при решении прямой задачи равиразведки // Докл.Академии наук. 2004. Т. 399, № 8. С. 1177–1179.

2. Долгаль А.С. Построение аналитических аппроксимаций геопотенциальных полей с учетом их фрактальной структуры / Долгаль А.С., Пугин А.В. // Докл. Академии наук. 2006. Т. 410. – С. 1152–1155.

3. Долгаль А.С. Применение кратномасштабного вейвлет-анализа при аналитических аппроксимациях геопотенциальных полей / Долгаль А.С., Симанов А.А. // Докл. Академии наук. 2008. Т. 418, № 2. – С. 256–261.

4. Долгаль А.С. Учет влияния рельефа земной поверхности при аэромагнитных измерениях / Долгаль А.С., Червоный Н.П. // Геоінформатика. 2008. № 2. – С. 58–66.

5. Дремин И.М. Вейвлеты и их использование / Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. // Успехи физических наук. 2001. Т. 171, № 3. – С. 465-501.

6. Петров А.В. Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» / А.В.Петров, Д.Б.Юдин , Хоу Сюели // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. Вып. 16. – С. 126–132.

7. Христенко Л.А. Электрометрические наблюдения при оценке влияния выработанного пространства недр на основание железнодорожной насыпи / Христенко Л.А., Степанов Ю.И. // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7. – С. 58-62.

8. Христенко Л.А. Интерпретация профильных электрометрических наблюдений, выполненных в пределах Верхнекамского месторождения солей / Христенко Л.А., Степанов Ю.И. // Международная конференция «Седьмые научные чтения Ю.П. Булашевича «Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей», материалы конференции 8-13 сентября 2013. Екатеринбург: Гф УрО РАН, 2013. – С. 327–328.

9. Христенко Л.А. Вероятностно-статистические методы интерпретации данных электроразведки ЕП и СЭП при решении инженерно-геологических задач / Христенко Л.А., Степанов Ю.И. // XIVth International Conference –Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 11-14 May 2015, Kiev, Ukraine. Доступен по адресу http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=80207

УДК 550.34

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ РОЕВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СЕЙСМОАКТИВНОМ РЕГИОНЕ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

В.С. Чалова, И.Н. Литовченко*, irgal05@rambler.ru*

Институт сейсмологии Республики Казахстан, г. Алматы

Аннотация. *Областью исследования является распознавание образов в прикладных задачах. Предлагается универсальный алгоритм распознавания роевых последовательностей событий на примере землетрясений сейсмоактивного региона. Результатом работы такого алгоритма является оконтуривание распознанных событий и вынесение их на карту.*

ALGORITHM RECOGNITION SEQUENCES SWARM OF EARTHQUAKES IN SEISMICALLY ACTIVE REGION OF THE NORTHERN TIEN SHAN AND ADJACENT TERRITORIES

VS Chalova, IN Litovchenko*, irgal05@rambler.ru*

Seismology Institute of the Republic of Kazakhstan, Almaty

Annotation. *The scope of the research is to recognize images in applications. The universal recognition algorithm swarm sequences of events on the example of earthquakes seismic regions. The result of this algorithm is the delineation of the recognized events and making them on the map.*

В работах авторов [1, 3, 4, 8, 10, 12] ранее описывался процесс распознавания роевых последовательностей землетрясений. Было подробно представлено возникновение и распределение таких последовательностей в разных сейсмоактивных регионах. На современном материале о сейсмичности региона Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий, представляется аналогичный подход для распознавания и распределения «роевых последовательностей». Как известно, «рой землетрясений» выражается в увеличении числа слабых толчков в некоторой локальной зоне земной коры с последующим постепенным его уменьшением. Известно, что «рои» образуются в очаговых зонах землетрясений с M=6-7 за несколько лет до основного толчка [3,4,10,12]. Пространственные размеры «роев», примерно, равны размерам эпицентральных зон сильных землетрясений. «Рои» наряду с «форшоками» образуют прогностические последовательности сейсмических событий, которые можно использовать для прогноза сильных землетрясений, отсюда возникает необходимость их своевременного распознавания [8, 10, 12]. Для решения этой задачи предлагается использовать метод графической кластеризации временных последовательностей событий (МГКл) [3]. В некоторых других исследованиях [10] отмечается, что «рои землетрясений» - это особый вид проявления сейсмической активности, когда за достаточно короткое время, в течение нескольких суток от 1 до 5-15 суток (редко более длительное время), в одном и том же месте, на ограниченной площади, происходит большое количество землетрясений, как правило, малых энергетических классов, характерных для фоновой сейсмичности региона. Причем, как отмечается там же [10], что в отличие от «афтершоковой последовательности», «роевые последовательности землетрясений» не всегда имеют главное событие старшего энергетического класса, а также характерного затухания энергии событий во времени [10]. Как отмечается в литературе [3, 8,10, 12], физическая природа возникновения «роев» не ясна. Они возникают, как в зонах континентальной сейсмичности (например, на Кавказе), так и в зонах субдукции (Курило-Камчатская зона) [10]. Иногда в тех областях, где в прошлые годы имели место сильные землетрясения, обнаруживаются «рои», а иногда нет.

В данном исследовании применялся в качестве исходных данных каталог землетрясений [9]. Теоретическим методом выделения «роевых последовательностей» событий выступал следующий подход. Пусть за время T на ограниченной территории происходит N землетрясений a(11),a(12),...,a(NN). Каждое из этих событий характеризуется

набором параметров, часть из которых может повторяться (координаты, магнитуда, и т.п.), другие же не повторяются никогда. Всегда можно составить матрицу R состояний (1), симметричную с нулевой диагональю (имея в виду, что в общем случае матрица R может быть многомерной). Следуя общепринятым методам кластерного анализа, должны проанализировать соответствие элементов строк в (1) заданным правилам. Например, считаем, что если существует пространственная взаимосвязь и взаимообусловленность событий, то она должна выражаться через "расстояния" (евклидовы или другие) между событиями в n-мерном пространстве. Если известны географические координаты события, то в качестве меры взаимосвязи выбираем геометрическое расстояние между эпицентрами землетрясений.

$$R = \begin{bmatrix} a_{11}a_{12}...a_{1N} \\ a_{21}a_{22}...a_{2N} \\ ..... \\ a_{N1}a_{N2}...a_{NN} \end{bmatrix} \qquad (1)$$

Считая, что наиболее взаимосвязанными являются те события, для которых межэпицентральные расстояния минимальны. После определения соответствия заданному правилу элементов матрицы (1) в заданном пространстве параметров (например, расстояние между событиями) наносим их на график и соединяем между собой линиями в последовательности, следующей из (1). При наличии взаимосвязи и взаимообусловленности событий в матрице (1) на графике образуются связанные древовидные структуры. Узлы каждого из таких деревьев, образуют кластеры, подобные рассчитанным другими методами кластерного анализа. МГКл [3] не требует дополнительных математических операций для кластеризации, и поэтому выполняется значительно быстрее, чем другие методы кластерного анализа. Вообще время проведения расчетов для МГКл пропорционально числу событий в выборке образующей матрицу (1). Очевидным преимуществом МГКл является то, что в анализируемом пространстве состояний допустимы пересекающиеся подмножества. Такие ситуации могут возникнуть при анализе временных последовательностей событий, когда существуют кластеры, время жизни которых меньше интервала всей выборки. Использовали МГКл для выделения «роев» в Каталоге землетрясений [11] на Северном Тянь-Шане и прилегающих территориях за 1960-2013 г.г. [11], применяемом в Институте сейсмологии РК. Предварительно в каталоге [11] были выделены афтершоки по алгоритму [6]. В дальнейших расчетах эти события не принимались во внимание. Представительность каталога [9] не равномерна во времени и в пространстве. Так для территории, ограниченной координатами 39-47^{0}N и 70^0-85^{0}E в 1964-1982 гг. представительными являются землетрясения с К≥8 (М=2.2), и с 1982-2014 гг. с К≥7 (М=1.7). В дальнейших расчетах не выходим за пределы этого района. Выбор этой территории обусловлен тем, что здесь раньше происходили сильные землетрясения с М≥7-8 (Верненское 1887 г., М=7.5, Чиликское 1889г., М=8.4, Кеминское 1911 г., М=8.3). В анализируемом каталоге [9] отмечено более 87 землетрясений с М≥5, в том числе: Сарыкамышское 1970 г., М=6.8, Жаланаштюпское 1978 г., М=6.8, Байсорунское 1990 г., М=6.3. Здесь по долгосрочному прогнозу [1,2, 3, 7, 12] ожидается период активизации сейсмической активности, и могут произойти сильные землетрясения. Во-первых, определили численные характеристики «роев», как последовательности землетрясений пригодные для их описания и распознавания роев в каталоге. Это представляется важным, поскольку, не были известны объективные критерии для распознавания и выделения «роев». В общих чертах, процесс образования «роя» можно идентифицировать с процедурой пространственного группирования сейсмических событий. Некоторые, самые общие, качественные характеристики группирования для землетрясений с К≥9 (М=2.8) на территории Северного Тянь-Шаня приведены в [12]. Здесь за радиус вероятного группирования принимали 15 км. При этом количество группирующихся землетрясений составило 10% от размера выборки. Исследовался каталог [9] на способность образовывать компактные группы событий вводя ограничивающее правило при расчете

матрицы (1). Оказалось, что устойчивые кластеры-группы размером не более 20'-25' угловой меры (т.е. размеров очаговых зон землетрясений с M=6-7 на изучаемой территории) образуются, если расстояние между событиями L≤10', т.е. примерно такие же, как у [3, 4, 10, 12]. Следующая характеристика «роев землетрясений» связана с числом землетрясений в «рое» (или группе). Легко показать, что вероятность попадания трех случайных событий в площадку радиусом равным L=10' столь мала, что ей можно пренебречь. Поэтому принимали за «рой» группу, в которой число землетрясений N≥3, без ограничения N по максимальной величине. Результаты расчетов по МГКл [3] с учетом L и N показали, что «рои» действительно группируются вблизи зон, в которых на изучаемой территории происходили землетрясения с M≥5.5. Однако их распределение в пространстве имеет большую дисперсию, что указывает на необходимость введения еще одной характеристики для более строгого описания роя. Известно, что «рои» могут быть и короткоживущие (минуты, часы), так и долгоживущие (месяцы и даже годы). Поэтому их нельзя характеризовать ни числом событий N, ни временем жизни «роя» Tls («life swarm»). Более объективной характеристикой является время между землетрясениями в «рое» Tm.

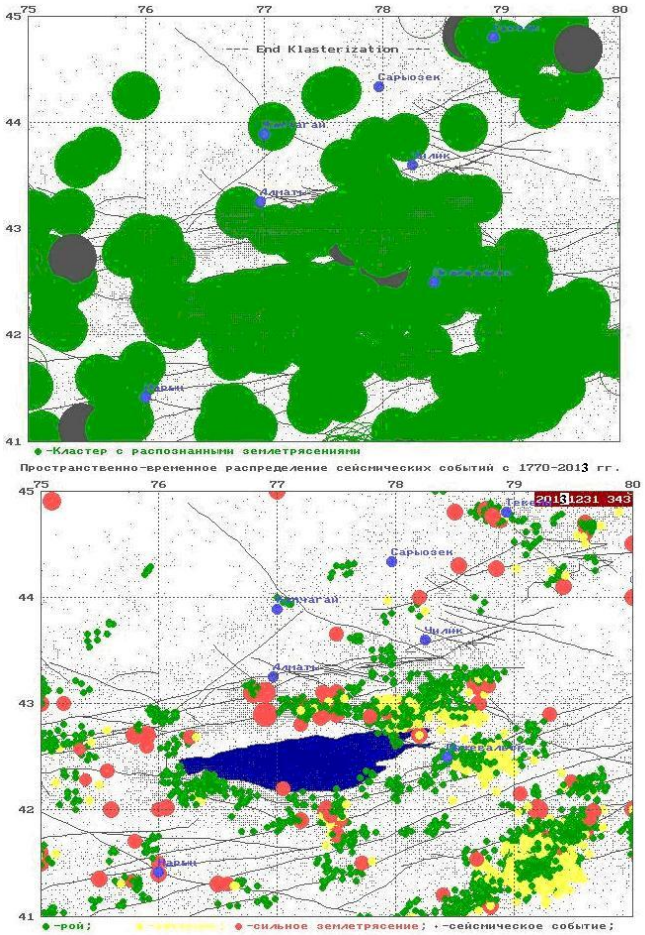


Рисунок 1 – Распределение: 1 - кластеров (зеленым) – верхний, распознанных землетрясений; 2 - (нижний): «рои» – зеленым цветом, «афтершоки» – желтым цветом, «сильные землетрясения» - красным, простые землетрясения – черным цветом на Северном Тянь-Шане за 1970-2014 г.г. с K≥7.0

По представленным теоретическим обоснованиям и методам возникновения и распределения «роевых последовательностей землетрясений», а так же практическому алгоритму их распознавания [12] на рисунках 1, 2 приведены результаты работы программы распознавания «роев». Карты-схемы кластеров рисунок 1 (зеленым) распознанных «роевых последовательностей землетрясений» регионов исследования, пространственно-временное распределение сейсмических событий («роев», «афтершоков», «сильных» и простых землетрясений). Получен каталог распознанных «роевых последовательностей землетрясений» для каждого сейсмоактивного региона. В результате исследования

параметров «роевых последовательностей землетрясений», получили три численные характеристики, по которым можно объективно распознавать «рои» в каталоге землетрясений на Северном Тянь-Шане и прилегающих территорий. К ним относятся: число землетрясений в «рое» N≥3; пространственное расстояние между соседними событиями, образующими «рой» L≤10' в угловой мере; время между событиями в «рое» 0<Tm≤15-26 дней. Используя эти ограничивающие численные значения, провели расчеты МГКл [3, 12] и составили каталог «роев» для территории Северного Тянь-Шаня, прилегающих территорий за период с 1970 по 2014 г.г. На всем интервале анализа принимали в расчет все землетрясения с К≥7.0. Подробнее остановимся на рисунках 1, 2. В центре карт расположено озеро Иссык-Куль. На картах нанесены линии выходов тектонических разломов на поверхность Земли. Эта карта составлена в Институте сейсмологии РК [11] по данным космической фотосъемки. На рисунке 2 выделены землетрясения, образующие «рои» и «афтершоки» сильных землетрясений. По полученным результатам, наблюдается явная привязка пространственного распределения «роев» к основным тектоническим структурам региона. Рисунки 1, 2 представляют результат работы компьютерной программы, демонстрирующей развитие сейсмического процесса во времени. При визуальном просмотре четко видно, что «рои» возникают в эпицентральной зоне будущего сильного землетрясения за 10-15 лет до толчка и импульсивно появляются и исчезают. Эта особенность может служить для создания самостоятельной численной основы для прогноза землетрясений на Северном Тянь-Шане и прилегающих территориях. Каталог «роевых землетрясений» может служить основой для поиска «форшоков» и прогноза сильных землетрясений.

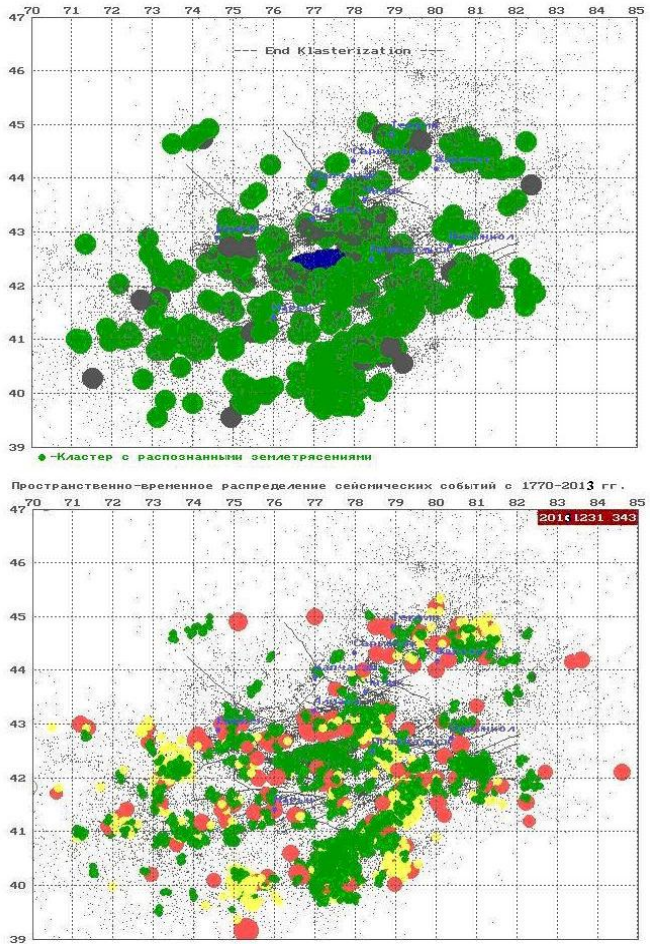


Рисунок 2 – Распределение: 1 - кластеров (зеленым цветом) – верхний, распознанных землетрясений (нижний): «рои» – зеленым цветом, «афтершоки» – желтым цветом, «сильные землетрясения» - красным цветом, простые землетрясения – черным цветом на Северном Тянь-Шане и прилегающих территориях
за 1970-2014 г.г. с К≥7.0

Можно сделать несколько выводов: 1. Разработан алгоритм и составлен пакет программ для выделения «роев землетрясений» методом графической кластеризации МГКл [3, 4, 12]. 2. Изучены статистические характеристики формирования «роев землетрясений» по данным Регионального каталога землетрясений за 1970-2014 г.г. [9], определены числовые характеристики для распознавания «роев»: число событий в «рое», расстояние между последовательными событиями и время между последовательными событиями. 3. По результатам расчетов составлен Каталог «роевых землетрясений» на Северном Тянь-Шане и прилегающим территориям, составлены программы и построены карты распределения «роев». 4. Показано, что «рои» возникают в эпицентральной зоне будущих сильных землетрясений за 10-15 лет до толчка и импульсивно появляются и исчезают. Эти особенности могут служить для создания самостоятельной численной основы для долгосрочного и краткосрочного прогноза землетрясений на Северном Тянь-Шане и прилегающих территорий. 5. В современных условиях активизации сейсмичности в регионе исследования становится объективно необходимым отслеживать «роевые последовательности землетрясений» в целях упреждения возникновения сильных землетрясений. 6. Алгоритм распознавания роевых последовательностей землетрясений в сейсмоактивном регионе Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий может быть адаптирован к любому сейсмоактивному региону Земли. 7. Результаты, полученные с помощью алгоритма МГКл, носят не только научный, но и практический характер.

Литература

1 Курскеев А.К. Землетрясения и сейсмическая безопасность Казахстана. Алматы, 2004.-504с.

2 Курскеев А.К., Абаканов Т.Д. Ритмы и энергетика современных геодинамических и сейсмических процессов. Алматы, 2007, 64 с.

3 Казаков В.В., Литовченко И.Н., Паршуков М.Ю. Рои землетрясений на Северном Тянь-Шане // Прогноз землетрясений и глубинная геодинамика. Материалы международного симпозиума. Алматы, 1997. - СС.145-151.

4 Литовченко И.Н., Чалова В.С. Исследовательский прототип программы графической кластеризации временных последовательностей событий//Материалы Конференции НПО.-Новосибирск, 2009.-5с.

5 Литовченко И.Н. Физические параметры очаговых зон сильных землетрясений земной коры Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий//Известия НАН РК. Серия геологическая.-N 5.- Алматы, 2009- с.59-67.

6 Литовченко И.Н. Соотношение сейсмичности с новейшими морфоструктурами Тянь-Шаня // Ggeophysical Preprint Online (http://www.wdbc.ru/GPO/2001)

7 Нерсесов И., Нурмагамбетов А., Сыдыков А., Детальное изучение сейсмического режима Казахстана и прилегающих территорий. Алма-Ата. 1982. 160 с.

8 Радзиминович Н. А., Очковская М. Г. Выделение афтершоковых и роевых последовательностей землетрясений байкальской рифтовой зоны // [Электронный ресурс] (2014).- http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0096

9 Региональный сейсмический каталог за 1960-2014 гг./ ГУ «СОМЭ КН МОН РК» (Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция Республики Казахстан).

10 Славина Л. Б., Левина В. И., Бабанова Д.Н. Особенности возникновения и распределения роевых последовательностей землетрясений в сейсмоактивной зоне в акватории Тихоокеанского побережья Камчатки// http://www.emsd.iks.ru/konf091011/pdf/largesteqs/10.pdf

11 Timush A.V. The newest morphostructures and tense-deformed condition of the Crust of Dzungaro-Northern-Tienshan region // Paper Abstracts'99 International Symposium on Tianshan Earthquakes. - Urumqi, 1999.- P. 137.

12 Чалова В.С., Литовченко И.Н. Распознавание образов временных последовательностей событий (на примере Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий) //http://technic.itizdat.ru/docs/litira/FIL13674854000N905016001/

УДК 550.34.013.4

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПРИЛИВНЫХ СИЛ ЛУНЫ И СОЛНЦА, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ТЕЛО ЗАДАННОЙ МАССЫ С УЧЕТОМ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

***Д.Л. Чубаров*[1]**, *convert008@mail.ru*, ***В.А. Кочнев*[2]**, *kochnev@icm.krasn.ru*
[1] *– Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия,* [2] *– Институт Вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Россия*

Аннотация. В данной статье описывается методика расчета и анализ модели влияния приливных сил Луны и Солнца на объект на поверхности Земли. Приведены формулы расчета, проиллюстрированы результаты исследования.

CALCULATION AN ANALYSIS OF MOON'S AND SUN'S TIDAL FORCES, ACTING ON UNIT MASS BODY

***D.L. Chubarov*[1]**, *convert008@mail.ru*, ***V.A. Kochnev*[2]**, *kochnev@icm.krasn.ru*,
[1] *– National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia,* [2] *– Institute of Computational Modeling, Krasnoyarsk, Russia*

Annotation. The article describes process of modeling and analysis of influence of Moon's and Sun's tidal forces on an object, situated on Earth surface. Also, calculation formulas and illustrations of results are given.

Общеизвестный факт – у берегов морей и океанов вода дважды в сутки поднимается до некоторого максимального уровня и дважды в сутки опускается до минимального. Исходной причиной этих явлений являются приливные (приливообразующие) силы, действующие на Землю со стороны Солнца и Луны (в значительно меньшей степени они действуют и со стороны других небесных тел).

Однако приливные силы влияют не только на перемещение водных масс, но и на изменение формы Земной поверхности. Более того, существует ряд областей, где влияние приливных сил так же велико. Так, по мнению некоторых авторов, приливные силы вызывают движения отдельных блоков, плит и континентов [1]. Для планет солнечной системы как правило рассматривается два механизма образования приливных сил: силы, вызванные удалением и приближением спутников к планете за счет эллипсоидной орбиты и механизм, вызванный совокупностью гравитационных сил и вращения планеты [3]. Причем считается, что первый механизм более сильный, чем второй [3].

На наш взгляд это не всегда так и поэтому в данной статье рассматривается второй механизм. Именно он был использован для обоснования генерации магнитного поля Земли и других планет [2].

Цель работы – приняв за основу известную математическую модель действия приливных сил [4] усовершенствовать ее и рассчитать влияние этих сил на условный объект, находящийся на поверхности Земли, принимая во внимание ее вращение.

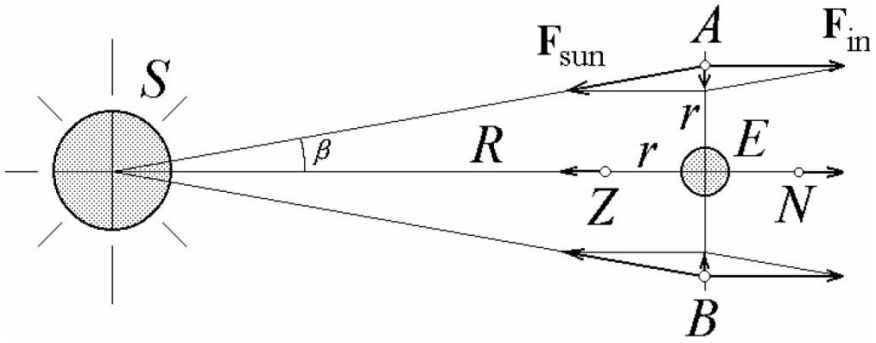


Рис. 1. Происхождение приливных сил вблизи Земли в неоднородном поле солнечного (лунного) тяготения [4]

Рисунок 1 схематически иллюстрирует происхождение и свойства приливообразующих сил, вызванных Солнцем. Ускорение свободного падения Земли E в поле тяготения Солнца S равно $a_0 = GM_{Sun}/R^2$, где M_{Sun} – масса Солнца, а R – расстояние между центрами Земли и Солнца. Сила притяжения $\mathbf{F}_{Sun}$ к Солнцу некоторого тела (например, спутника Земли), находящегося в точке A, почти равна силе инерции $\mathbf{F}_{in}$ по величине, потому что расстояния от центра Солнца до тела и до центра Земли почти одинаковы. Однако в точке A направление силы $\mathbf{F}_{Sun}$ не в точности противоположно направлению силы инерции $\mathbf{F}_{in} = -m\mathbf{a}_0$. Поэтому результирующая этих сил, т.е. приливная сила $\mathbf{F}_A$ в точке A, отлична от нуля и направлена к центру Земли. Как видно из рисунка, ее величина рана $ma_0\beta$, где $\beta = r/R$ – угол между направлениями на тело и на центр Земли из центра Солнца. Подставляя сюда $a_0 = GM_{Sun}/R^2$, для приливной силы в точке A получаем:

$$F_A = G\frac{mM_{Sun}}{R^2}\frac{r}{R}.$$

Приливная сила $\mathbf{F}_B$ в противоположной точке B равна $\mathbf{F}_A$ по величине, но направлена противоположно, т.е. тоже вертикально вниз. На поверхности Земли приливная сила направлена вертикально вниз во всех точках, для которых Солнце в данный момент находится на горизонте [4].

Если тело находится в точке Z (для которой Солнце оказывается в зените), расстояние от тела до центра Солнца меньше, чем от центра Земли. Здесь сила тяготения Солнца в точности противоположна силе инерции, но имеет несколько большую величину. Поэтому приливная сила $\mathbf{F}_Z$ в точке Z направлена вертикально вверх, от Земли к Солнцу. Ее величина дается соответствующей разностью:

$$F_z = G\frac{mM_{Sun}}{(R-r)^2} - ma_0 = ma_0\left[\frac{R^2}{(R-r)^2} - 1\right] \approx ma_0\frac{2r}{R} = G\frac{mM_{Sun}}{R^2}\frac{2r}{R} \qquad (1)$$

Точно такие же формулы применимы и для влияния Луны.

Однако во всех рассмотренных выше четырех точках приливные силы имеют вертикальные направления. Оказывается, что в промежуточных точках приливные силы имеют горизонтальные составляющие (рис. 2).

Горизонтальные и вертикальные составляющие вектора приливной силы рассчитываются с учетом угла θ.

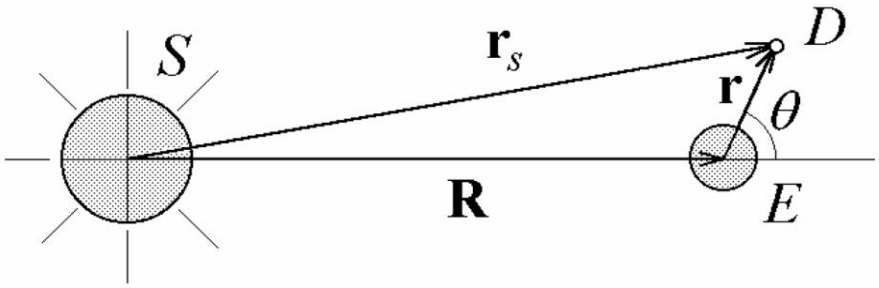


Рис. 2. Переменные r и θ, используемые для указания положения произвольной точки вблизи Земли [4].

$$F_{hor} = -3G\frac{mM_{Sun}}{R^3}r\cos\theta\sin\theta = -\frac{3}{2}G\frac{mM_{Sun}}{R^3}r\sin 2\theta \qquad (2)$$

$$F_{vert} = G\frac{mM_{Sun}}{R^3}r(3\cos^2\theta - 1) = \frac{3}{2}G\frac{mM_{Sun}}{R^3}r\left(\cos 2\theta + \frac{1}{3}\right) \qquad (3)$$

Соответственно, как видно из формул, максимальные значения для горизонтальной составляющей будут наблюдаться при θ = 45° и 135°, а при θ = 0°, 90°, 180°, 270° будут равны нулю. Соответствующие экстремумы вертикальной компоненты смещены на 45°.

Если же говорить о различие этих составляющих в зависимости от широты, то в таком случае нужно ввести величину r', которая характеризует расстояние от исследуемой точки до оси вращения Земли: r'=r*cosα , где α - широтный угол. В таком случае, очевидно, что максимальное значение приливной силы будет на экваторе, минимальное – на полюсах.

Далее необходимо принимать во внимание, что взаимное положение Луны и Солнца – величина переменная, поэтому для разных положений на одну и ту же точку будет оказываться разное суммарное воздействие. Данную проблему можно решить, перебрав все возможные взаимные расположения Луны и Солнца (при шаге в 1 градус таких положений насчитывается 129600). Суммарная величина горизонтальной компоненты приливной силы находится сложением аналогичных компонент для Солнца и Луны при соответствующих их положениях.

Для примера рассмотрим случай, приведенный на рисунке 3. Для экваториальной широты величина горизонтальной составляющей приливной силы, действующей со стороны Солнца и Луны на точку, будет находиться по формуле (2). В первом случае (со стороны Солнца) будет задействован угол θ_1, во втором (со стороны Луны) – θ_2. Общее значение горизонтальной компоненты будет находиться путем сложения этих двух величин.

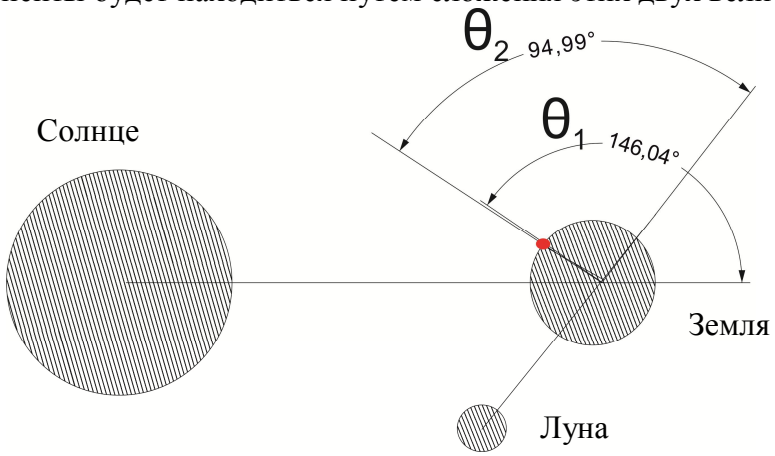


Рис. 3. Пример взаимного расположения Солнца и Луны

Рассмотрим модель действия приливных сил Луны и Солнца на тело, представляющее собой куб с ребром 1 км, состоящий из воды с плотностью 1г/см^3 (масса такого объекта будет равна 10^{12} кг).

Для всех возможных положений Солнца и Луны на экваториальной широте получены следующие значения вертикальных и горизонтальных компонент:

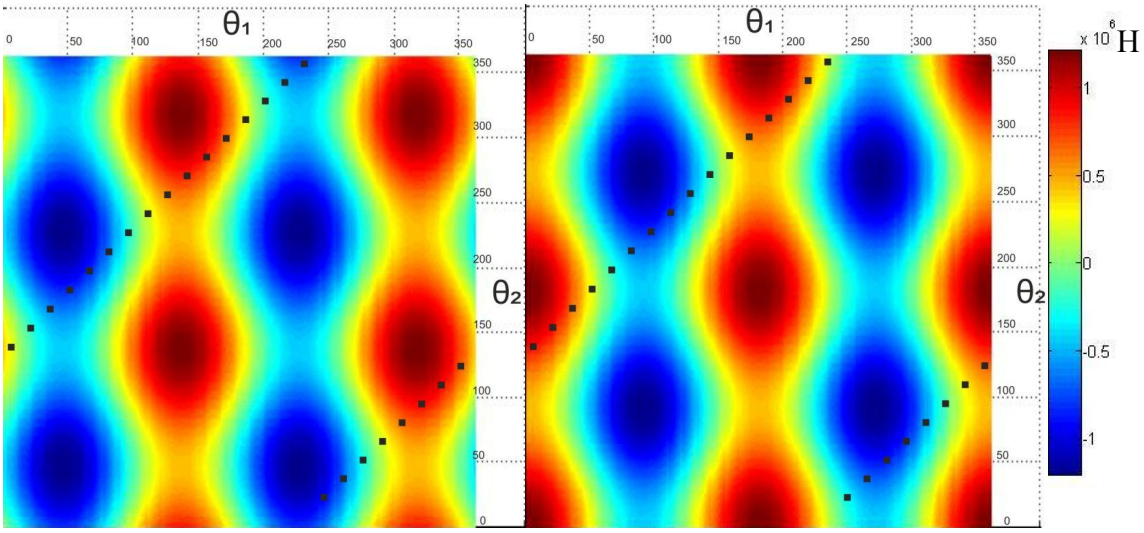


Рис. 4. Значения суммарной величины горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) составляющих приливной силы Солнца и Луны. Ось x – значение угла θ_1, ось y – значение угла θ_2

Модуль суммарного вектора приливной силы рассчитывался по формуле $F = \sqrt{F_{hor}^2 + F_{vert}^2}$. Значения этой величины представлены на рисунке 5.

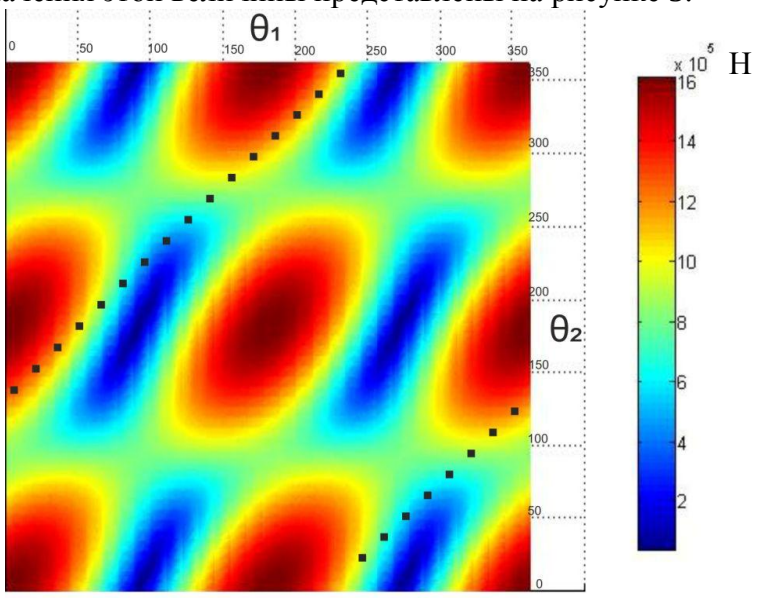


Рис. 5. Значение модуля суммарного вектора приливной силы Солнца и Луны. Ось x – значение угла θ_1, ось y – значение угла θ_2

условные обозначения:

Суточные вариации (шаг – 1 час)

Для наглядности на рисунке представлены изменения модуля вектора приливной силы в точке с координатами (0°; 73,8° В) в течение суток. На рисунке 6 представлен график изменения значений вертикальной и горизонтальной компонент, а так же модуля суммарного вектора приливных сил в течение суток (иными словами – разрез трех графиков, представленных на рисунках 4 и 5).

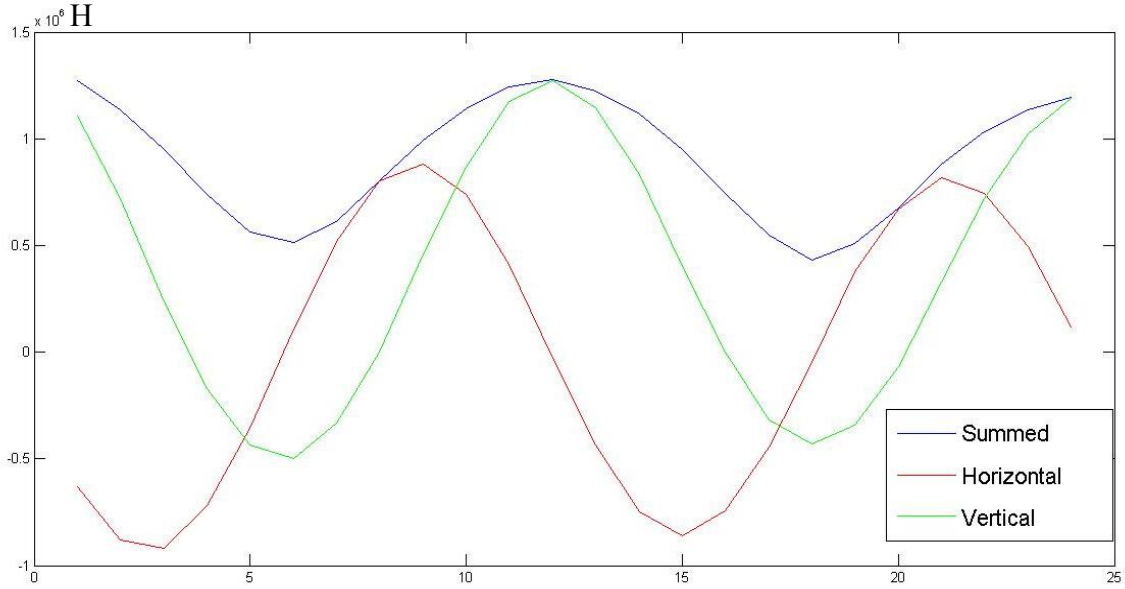


Рис. 6. Изменения компонент и модуля суммарного вектора приливных сил в течение суток в точке с координатами 0°; 73,8° В

Как можно видеть из рисунка, в разные периоды времени поверхность Земли может испытывать разное по величине влияние приливных сил, что в теории может являться причиной различного рода природных явлений.

Список литературы

1. Авсюк Ю. Н. Связь приливной эволюции системы Земля-Луна с проблемами геодинамики// Вестник Российской Академии Наук. 1996. Т.66 №2 – с.129 – 134;
2. Кочнев В. А. Кинематико-гравитационная модель геодинамо// Геофизический журнал №4, т.35, 2013г. – с. 3 – 15;
3. Мюррэй К. Динамика Солнечной системы //К. Мюррэй, С. Дермотт, Изд-во ФИЗМАТЛИТ, М. – 588 с;
4. Eugene Butikov. *A Dynamical Picture of the Oceanic Tides*. American Journal of Physics, v. 70, No 10 (October 2002) pp. 1001 – 1011.

УДК 550.361.+550.834. 551.24

СКОРОСТНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО (БАЛТИЙСКОГО) ЩИТА

Шаров Н.В., *sharov@krc.karelia.ru*
Институт геологии КарНЦ РАН, ПетрГУ, Петрозаводск

Аннотация.

По совокупности данных ГСЗ, МОВ-ОГТ, с привлечением материалов сейсмологии местных и удаленных землетрясений, накопленных на территории Фенноскандинавского щита за последние сорок лет, сделаны обобщающие построения, которые позволили получить количественные сведения о горизонтальных и вертикальных неоднородностях литосферы. Впервые построены объемные сейсмологические модели для отдельных частей Фенноскандинавского щита, которые показывают, что структура кристаллической коры приоретает блочно-иерархическое,строение, внутри нее не обнаружено выдержанных сейсмических границ в пределах всего щита. В верхней части коры локально развиты как волноводы, так и высокоскоростные зоны, коррелирующиеся с геологическими телами. Отмечено несоответствие структурных планов изолиний скорости разных глубинных срезов. Доказано, что основные геотектонические провинции отличаются мощностью коры, а вулканогенные раннепротерозойские пояса характеризуются повышенной скоростью и мощностью земной коры. В верхней мантии выделены слои с аномально высокой скоростью.

VELOCITY HETEROGENEITIES IN THE LITHOSPHERE OF THE FENNOSCANDIAN (BALTIC) SHIELD

Sharov N.V.
Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

Abstract.

On the basis of the integrated DSS and CDP data and seismological evidence of local and remote earthquakes obtained for the Fennoscandian Shield over the last forty years, generalized reconstructions have been made which have provided quantitative information on the horizontal and vertical heterogeneities of the lithosphere. Three-dimensional seismological models for some parts of the Fennoscandian Shield have been constructed for the first time. They show that the crystalline crust attains a blocky-hierarchical structure and that no persistent seismic boundaries have been found within the entire shield. In the upper part of the crust, both waveguides and high-velocity zones, which correlate with geological bodies, occur locally. The structural plans of velocity isolines in various deep sections have been found to be inconsistent. It has been proved that major geotectonic provinces differ in crustal thickness, while Early Proterozoic volcanogenic belts display an elevated velocity and crustal thickness. Abnormally high velocity layers have been identified in the upper mantle of the Fennoscandian Shield.

Скоростному строению литосферы Фенноскандинавского щита уделяется большое внимание. Такой интерес определяется двумя основными вопросами: классическими проблемами изучения глубинного строения Земли, с одной стороны, и задачами, связанными с определением перспективных областей в связи с минерагенией. При решении указанных задач наиболее используемыми являются методы сейсмической томографии, обеспечивающие решение обратной линеаризированной трехмерной кинематической задачи сейсмики. Методы развиваются с шестидесятых годов прошлого столетия и в настоящее время активно используются как для решения задач глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), так и сейсмологии.

Земная кора. На Фенноскандинавском щите выполнен большой объем международных и региональных сейсмических исследований с целью изучения

особенностей строения земной коры. Наблюдения проведены в областях развития различных комплексов кристаллических метаморфизованных и магматических пород. Сравнительный анализ волновых полей по всем профилям позволяет выбрать некую общую (базовую) модель земной коры, которую можно использовать как исходную для выявления общих тенденций изменения физических параметров кристаллической коры по площади. Такая модель является определенной формой аппроксимации реальной скоростной структуры коры, она позволяет представлять разрезы для всех профилей в единой форме и проводить построение трехмерной скоростной модели [1-4].

В качестве опорной модели для кристаллической коры исследуемого региона выбрана четырехслойная модель со скоростями продольных волн: 5.9-6.2 км/с в верхнем слое (верхний этаж); 6.3-6.5 км/с в среднем; 6.6-6.8 км/с в нижнем и 7.0-7.3 км/с в коро-мантийном. Четвертый высокоскоростной слой присутствует в районах с повышенной мощностью земной коры (рис. 1а) и часто входит в третий (нижний) слой. Его можно выделить на профилях ГСЗ, отработанных с длинными годографами 280-350 км, а также на разрезах, полученных методом обменных волн землетрясений (МОВЗ). Слои разделены условными отражающими горизонтальными $К_1$ и $К_2$ и отделены от верхней мантии границей М со скоростью 8.0-8.2 км/с. Граница $К_1$ залегает на различных глубинах, в верхней части коры имеются высокоскоростные внедрения и низкоскоростные пропластки мощностью 3-8 км в отдельных блоках. Граница $К_2$, скорей всего, обусловлена изменением реологических свойств пород на больших глубинах и поэтому с ней не связано изменение плотности. Из опыта моделирования, граница $К_1$, чаще всего, отражает изменение петрофизических свойств - увеличение основности пород разреза, что, как правило, отражается в увеличении плотности.

Поверхность Мохоровичича. Накоплен обширный сейсмический материал, освещающий глубинное строение Европейского Севера. Опыт показал, что поверхность Мохоровича (М) представляет собой наиболее выдержанную сейсмическую границу, которая создает устойчивые отраженные, преломленные и обменные волны [5]. Это обстоятельство дает возможность рассматривать данную поверхность в качестве опорного сейсмического репера и, следовательно, изображать ее на соответствующих картах системой изогипс (рис. 1а).

Сейсмический материал показал, что граница М не является постоянной непрерывной границей даже в разрезе одного профиля ГСЗ, и ее рельеф зависит от внешних и внутренних факторов, характерных для того или иного геоструктурного элемента [1]. В одних (северо-западная часть Кольского полуострова, Онежско-Ладожская площадь) в поле отраженных волн раздел М динамически выразителен, в других (профиль Кировск-Дальние Зеленцы, северный участок профиля Полар) на сейсмограммах отсутствуют характерные группы волн $P^{M}_{отр.}$. В южной части Кольского полуострова и Северной Карелии волны, отраженные от поверхности М, часто регистрируются в виде двух-трех групп осей синфазности, близких по интенсивности и форме колебаний, разделенных интервалов времени 0,2-0,5 с. В этом случае в переходной зоне от коры к мантии выделяются не одна, а две-три сейсмические границы, располагающиеся друг над другом с разницей по глубине до 5-8 км [6]. Высокоскоростной слой в низах коры распространен не повсеместно. На рис. 1а сделана попытка выявить его пространственное размещение. Главная трудность состояла в том, что для такого большого региона пока не существует одинаково надежного и полного по объему сейсмического материала об этом слое, поэтому показана ограниченная часть информации о его наличии или отсутствии. Отмеченные явления сложного перехода от коры к мантии на Европейском Севере делают затруднительным составление единой схемы изолиний глубин поверхности М.

Мощность земной коры на Европейском Севере изменяется от 25 до 62 км (рис. 1а). Максимальная - установлена под Свекофенской провинцией Фенноскандинавского щита в районе Ладожско-Ботнической зоны (64 км), в зоне сочленения Беломорского мегаблока с Карельским (48 км). Минимальная - зафиксирована под Южно-Баренцевоморской впадиной

(30 км). Мощность земной коры на западе Кольского полуострова составляет 40-42, на востоке 35 км. В Белом море она достигает 40-42, в районе Ладожского озера 50, а на севере Мезенской синеклизы 30 км.

Приведенная схема рельефа поверхности М отражает ее строение лишь в самых общих чертах. Фактически данная поверхность может быть построена гораздо сложнее, так как в отдельных сечениях зоны ее поднятия и погружения имеют довольно большие амплитуды. В связи с тем, что плотность сейсмических систем наблюдений была недостаточной, эти локальные участки требуют дополнительного изучения.

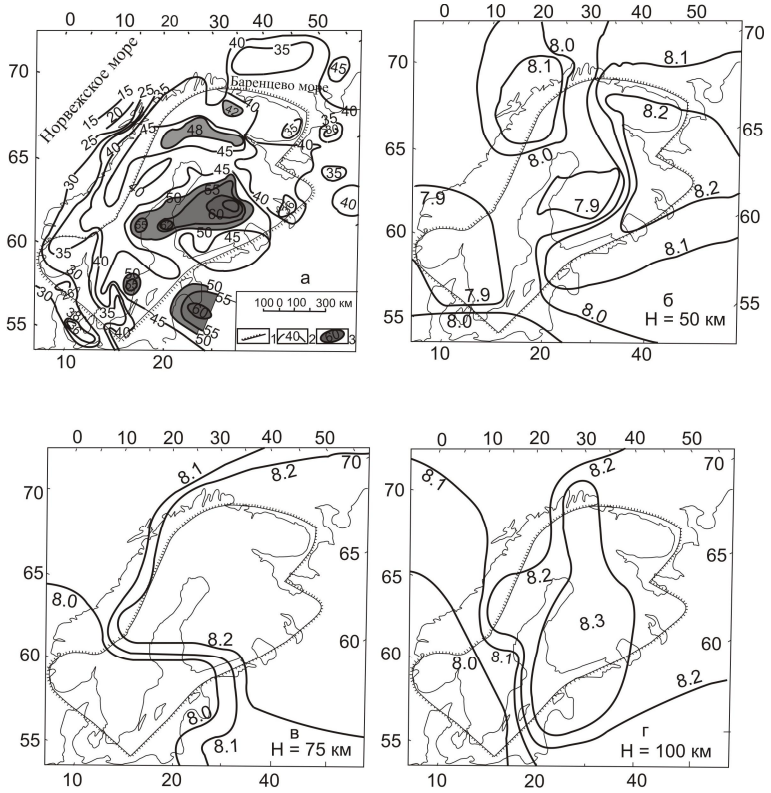


Рис. 1. Схема поверхности М (а) и распределение скорости продольных волн (изолинии в км/с) в литосфере на глубинах 50, 75, 100 км (б, в, г): 1 – граница Фенноскандинавского щита; 2 – изогипсы раздела М, км; 3 – поверхность скоростного уровня 7.0-7.3 км/с (коро-мантийные слои);

Таким образом, в строении земной коры Фенноскандинавского щита установлено: мозаично-неоднородная структура коры, внутри ее не обнаружено выдержанных сейсмических границ в пределах всего щита; в верхней части коры локально развиты как волноводы, так и высокоскоростные зоны, коррелирующиеся с геологическими телами; несоответствие структурных планов изолиний скорости разных глубинных срезов; основные геотектонические провинции отличаются по мощности коры и сейсмической неоднородности; вулканогенные раннепротерозойские пояса характеризуются повышенной скоростью и мощностью земной коры, а также аномально высокой граничной скоростью вдоль поверхности М.

Литосферная мантия. Полученные согласно 3-D Р-скоростные модели мантии под Евразией [7, 8] позволили построить трехмерную скоростную модель литосферы Фенноскандинавского щита, которая представлена в виде трех карт-срезов изолиний скорости для фиксированных глубин 50, 75, 100 км (рис. 1 б, в, г) и глубины 150, 200, 250, 300 км (рис. 2). Как видим среда в первом слое (нижняя кора и верхняя мантия) слабодифференцированна по скорости (рис. 1 б). Скорость продольных волн изменяется от 7,9 до 8,2 км/с., т.е. контраст скорости некоторых аномалий составляет 0,2-0,3 км/с. Только главные геотектонические провинции слабо отражаются на пространственном изменении

скоростных параметров, но нет простого соотношения между поверхностной геологией, мощностью коры и скоростью продольных волн в верхней части литосферы.

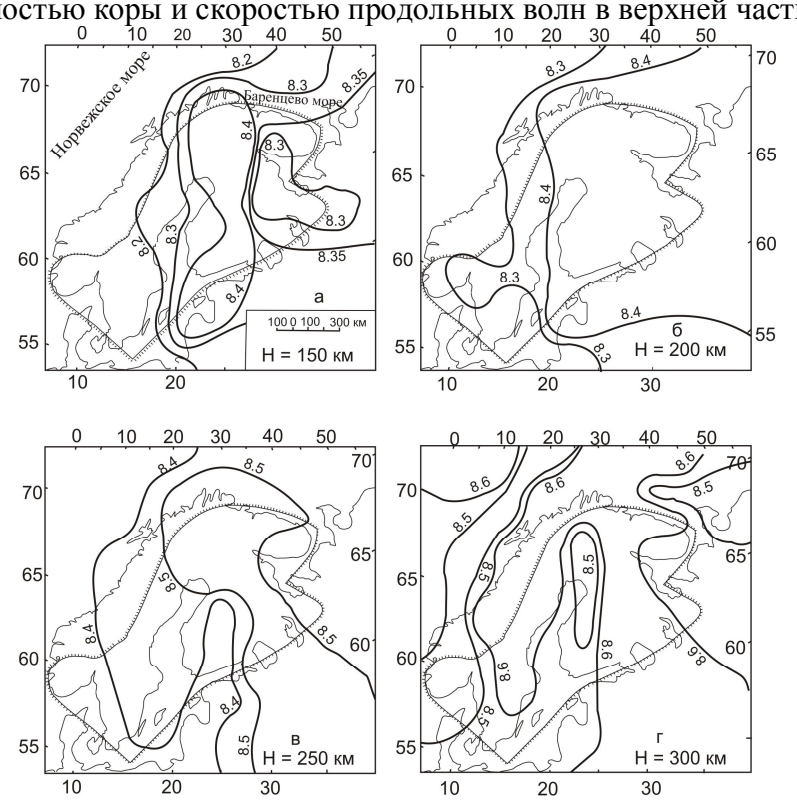


Рис. 2. Распределение скорости продольных волн (изолинии в км/с) в литосфере на глубинах 150, 200, 250, 300 км (а, б, в, г):

В литосфере между границей кора-мантия и глубиной 100 км. Скорость распространения продольных волн изменяется от 7,9 до 8,3 км/с. Имеются скоростные неоднородности с вертикальным размером 10-40 км и латеральной протяженностью от 200 до 1000 км (рис. 1 в, г). Отсутствуют низкоскоростные аномалии, где бы скорость продольных волн снижалась до 8 км/с. Наоборот, появляются высокоскоростные (8,3 км/с) тела. Аномалии скорости с глубиной не менее выражены чем на первом скоростном срезе. Отмечает несоответствие структурных планов изолинии скорости разных глубинных срезов литосферы. Наибольшее изменение скорости и ее увеличение до 8,3 км/с на томографических срезах наблюдается в архейской части щита (Лапландско- Кольско-Карельская провинция) и на западе Архангельской области.

Именно на этой огромной по площади территории щита, а также в северной части фундамента Русской платформы, т.е. в пределах Лапландско-Среднерусско-Южноприбалтийского орогена [10] с архейской консолидированной корой континентального типа, выделена самая сохранившаяся в мире, наиболее полно представленная характерными формациями палеопротерозойская Восточно-Скандинавская базитовая обширная изверженная провинция (ВСкБОИП – EScBLIP) плюмовой природы с промышленными ортомагматическими месторождениями Cr, Ni, Co, Cu, Au, Pt, Pd, Ti, V [11]. Самая нижняя высокоскоростная часть земной коры по отдельным профилям МОВЗ – ГСЗ этой провинции [3, 7] и данным по составу гипоксенолитов в трубках взрыва [5], а также сведения по высокоплотностным и высокоскоростным слоям мантийной литосферы (рис. 1, 2), позволяют рассматривать их как содержащие огромные массы плюмовых базитов (мантийных астенолитов). Это продукты палеопротерозойской магматической базификации – результат плюмового андерплейтинга архейской континентальной литосферы [11, 12].

Наблюдаемые сейсмические границы отражают современную структуру земной коры. Однако, этим не отрицается наличие реликтовых сейсмических границ в литосфере, при условии, что новейшие процессы не были очень активными. Границы могут сохраняться в

случаях совмещения новообразованных структур с древними. По-видимому, структуры литосферы Фенноскандинавского щита, претерпевшие интенсивную переработку в протерозое, с активным обменом мантийного и корового вещества, должны быть подвергнуты особо тщательным металлогеническим исследованиям. С этими структурами связаны многие твердые полезные ископаемые.

В **заключение** отметим что, составлена сейсмогеологическая модель неоднородностей литосферы. Выявлены некоторые зоны развития высокоскоростного этажа (7.0-7.3 км/с) в низах консолидированной коры, установлено, что чем мощнее кора, тем меньше контраст скорости на границе М. Построена карта поверхности Мохоровичича, учитывающая последние результаты сейсмических исследований. В литосфере выделены слои с аномально высокой скоростью и неоднородные по латерали.

Дальнейшая детализация полученных зависимостей и привлечение дополнительных геолого-геофизических материалов могут послужить не только основой для научного обоснования гипотез о происхождении и истории развития отдельных блоков Фенноскандинавского щита, но и помочь в решении проблем связи между глубинной структурой литосферы, строением верхних горизонтов земной коры и их металлогенического анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаров Н.В. Литосфера Балтийского щита по сейсмическим данным. Апатиты: КНЦ РАН, 1993. 144 с.
2. Korja A., Korja T., Luosto U. et al. Seismic and geoelectric evidence for collisional and extensional events in the Fennoscandian Shield – implications for Precambrian crustal evolution // Tectonophysics, 1993. V. 219. P. 129-152.
3. Mitrofanov F.P., Sharov N.V., Zagorodny V.G. et al. Crustal Structure of the Baltic Shield Along the Pechenga-Kostomuksha-Lovisa Geotraverse // International Geology Review, 1998. V. 40. № 11. P. 990-997.
4. Павленкова Н.И. Трехмерная модель земной коры Балтийского щита по данным глубинных сейсмических исследований // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 2006. № 12. С. 43-54.
5. Строение литосферы российской части Баренц-региона / Под ред. Н.В. Шарова, Ф.П. Митрофанова, М.Л. Вербы, К. Гиллена. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005, 318 с.
6. Шаров Н.В. Сейсмические данные о рельефе поверхности Мохоровичича Балтийского щита // Геофиз. журн. 1982. Т. 14. № 1. С. 91-97.
7. Шаров Н.В., Куликов В.С., Исанина Э.В., Крупнова Н.А. Сейсмогеологическая характеристика земной коры юго-восточной части Фенноскандинавского щита (Россия) // Геофиз. журн. 2010. Т. 32. № 3. С. 3-17.
8. Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Сейсмотомография Восточно-Европейской платформы: трехмерная Р-скоростная модель мантии под Фенноскандией – Ч. I. // Геофиз. журн. 2009. Т. 31. № 1. С. 53-72.
9. Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Сейсмотомография Восточно-Европейской платформы 3D Р-скоростная. модель Феннокандии. Ч. 2 // Геофиз. журн. 2010. Т. 32. № 1. С. 60-76.
10. Минц М.В. Объемная модель глубинного строения раннедокембрийской коры Восточно-Европейского кратона: палеогеодинамические следствия // Геотектоника. 2011. № 4. С. 3-29.
11. Митрофанов Ф.П., Баянова Т.Б., Корчагин А.У., Грошев Н.Ю., Малич К.Н., Жиров Д.В., Митрофанов А.Ф. Восточно-Скандинавская и Норильская плюмовые базитовые обширные изверженные провинции Pt – Pd руд: геологическое и металлогеническое сопоставление // Геология рудных месторождений. 2013. № 5. С. 1-17.
12. Шаров Н.В., Митрофанов Ф.П. Скоростные неоднородности литосферы Фенноскандинавского (Балтийского) щита // ДАН. 2014. Т. 454, №2. С. 221-224.

УДК 551.2

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОБЪЕМНУЮ АКТИВНОСТЬ РАДОНА (НА ПРИМЕРЕ ГОРНОГО АЛТАЯ)

А.В. Шитов, Н.Г. Кудрявцев, Д.В. Кудин, Е.О. Учайкин*, sav103@yandex.ru*
Горно-Алтайский государственный университет, г.Горно-Алтайск, Россия

В работе показано влияние сейсмических событий на Алтае на динамику объемной активности радона и метеохарактеристики. Также показано влияние землетрясения в Непале на данные показатели.

STUDY OF THE EFFECT OF SEISMIC EVENTS ON THE METEOROLOGICAL CHARACTERISTICS AND VOLUME ACTIVITY OF RADON (ON THE EXAMPLE OF MOUNTAIN ALTAI)

A.V. Shitov, N.G. Kudryavtsev, D.V. Kudin, E.O. Uchaykin*, sav103@yandex.ru*
Gorno-Altaisk State University, Gorno-Altaisk, Russia

The paper shows the impact of seismic events on Altai on the dynamics of radon concentrations and meteorological characteristics. Also shows the impact of the earthquake in Nepal on these indicators.

Геологическая среда нами рассматривается как пространство с высоким уровнем накопленной энергии, т.е. как энергосодержащая, энергонасыщенная среда, имеющая множество иерархических структурных связей [1]. При разрушении горные породы, вовлеченные в процесс релаксации напряжений, насыщены большим количеством трещин хрупкого отрыва, брекчированы, раздроблены. При этом, геологическая среда насыщенная структурными напряжениями является термодинамической системой, в которой при разрушении структурных связей, происходит интенсивная флюидная дегазация из литосферы в подземные воды и атмосферу, т.е. возможны изменения характеристик гидрогеологических, геохимических и атмосферных характеристик при подготовке сейсмического процесса. В качестве индикатора изменений мы использовали динамику радиоактивных газов (радон, торон) при транспортировке их в атмосферу и подземные воды. Кроме этого, необходимо учитывать, что уровень зеркала подземных вод зависит от сейсмических воздействий, эта зависимость, в свою очередь, приводит к изменениям капиллярного равновесия влаги, что будет управляет сорбцией-десорбцией с поверхности жесткого скелета почвенного радона, пропорционально меняя режим воздухообмена с приземной атмосферой и степень насыщения подземных вод радоном [2,3].

Для анализа нами использовались данные радонового мониторинга Горно-Алтайского государственного университета за период 2012-2015 гг. При этом велись наблюдения по следующим параметрам: динамика радона, торона, а также метеорологических характеристик: температуры, влажности, давления. Использовались данные сейсмической радоновой станции СРС-05, а также метеостанции ГАГУ (http://robionika.ru/dop).

Одновременно изучались также динамика сейсмической активности в Алтае-Саянской горной стране (http://gs.nsc.ru/russian/monitor.html). В результате были построены ряд совмещенных графиков изучаемых характеристик, что позволило анализировать одновременную динамику этих характеристик. Результаты анализа показаны на рисунке 1. По горизонтальной оси отложено время, цветом на СВАН диаграммах показано спектральная плотность (рисунок 2). На графике радона (рисунок 1) показано время землетрясений на территории Алтае-Саянского региона: А – Алтай, К – Казахстан, Т-Тыва, Кем – Кемеровская обл., Мон – Монголия.

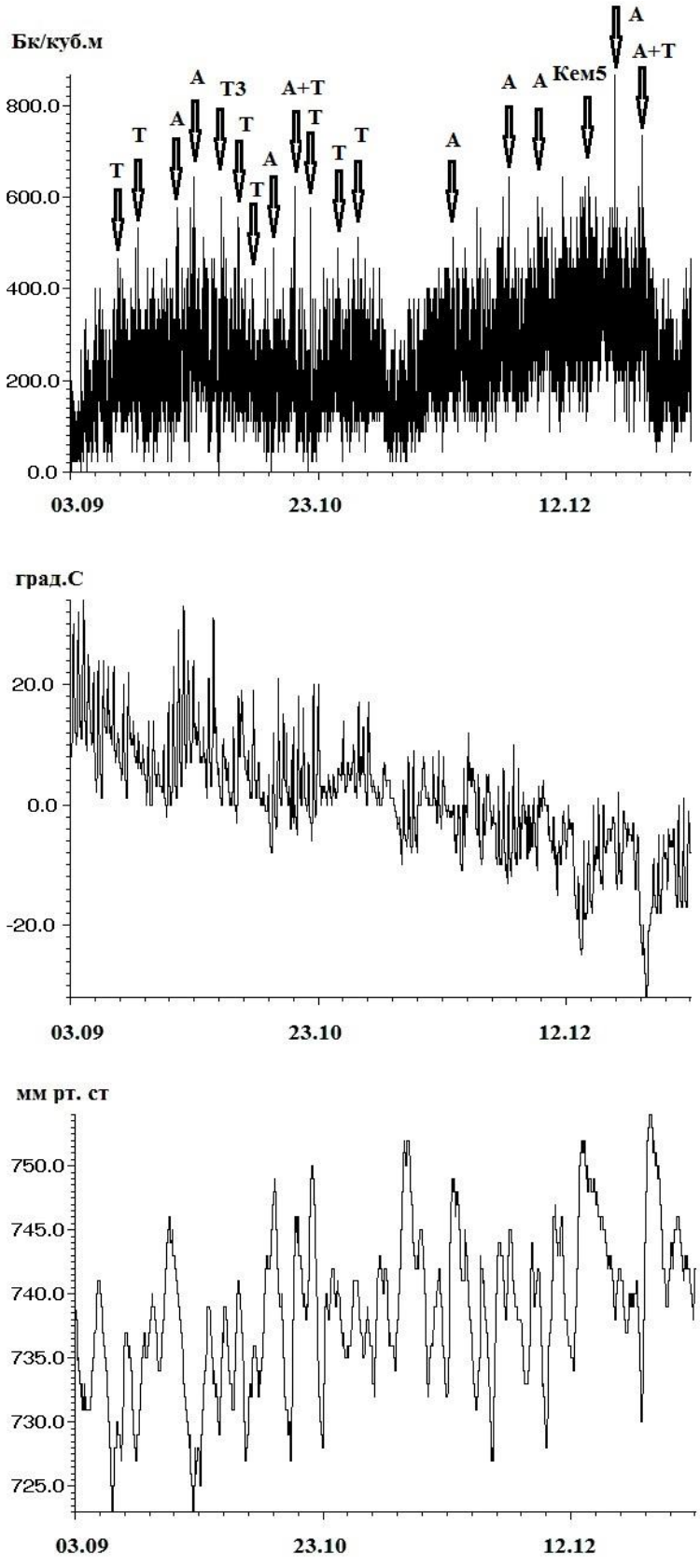


Рисунок 1 – Динамика радона, температуры атмосферы, атмосферного давления за период с 03.09.13 по 15.01.2014 г.

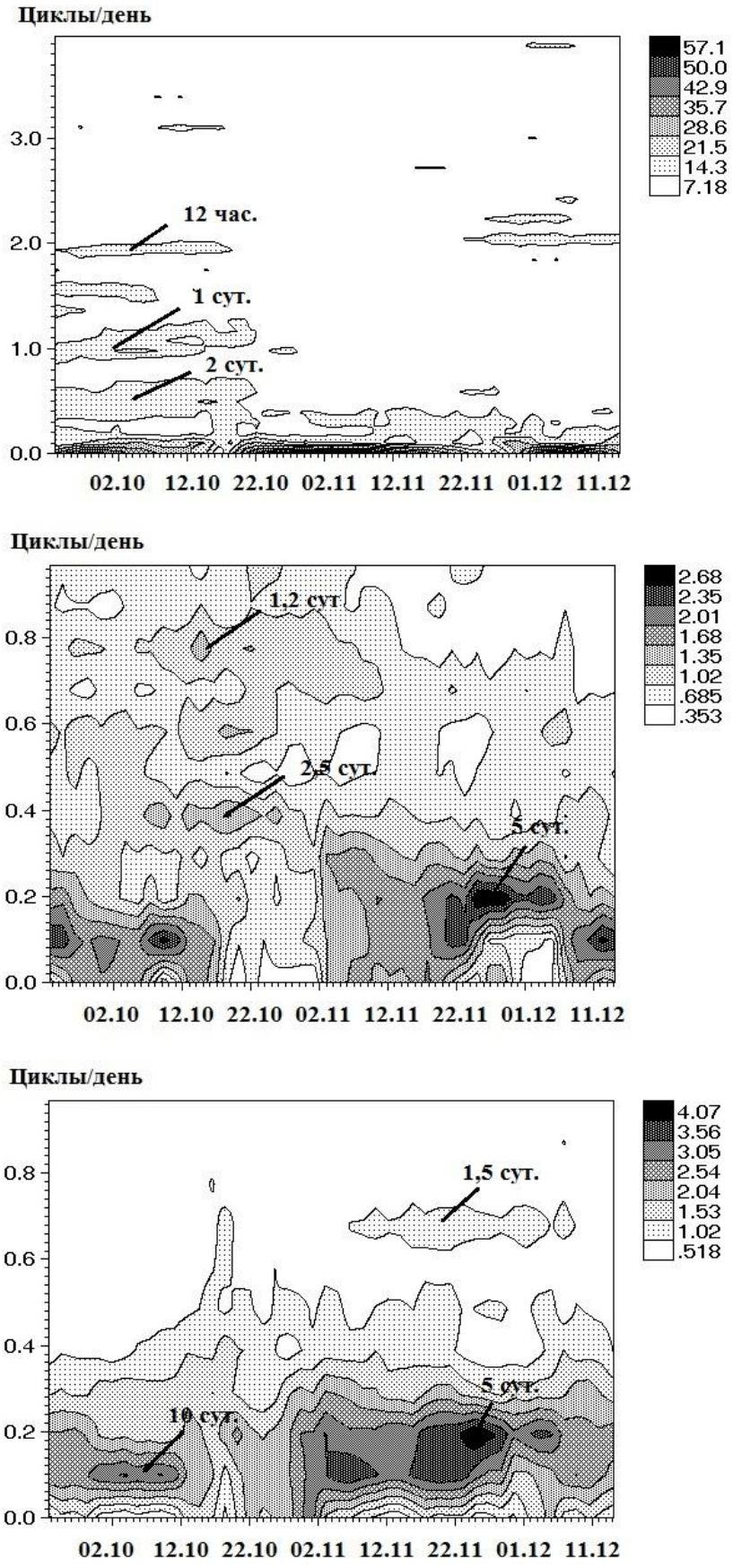


Рисунок 2 – СВАН-диаграмма динамики радона, температуры атмосферы, атмосферного давления за период с 03.09.13 по 15.01.2014 г.

Рассмотрим более детально конкретные временные интервалы. На временном интервале **03.09.13 – 15.01.14 г.** динамика радона существенно отличается от предыдущих периодов наблюдения. Здесь отчетливо проявляется 2 периода роста динамики радона от 20 до 600 (в максимальных значениях до 840 Бк/куб.м). Температурный тренд имеет тенденцию к понижению от +27 до -10˚С, сопровождавшийся резкими понижениями температуры от 0 до -25 ˚С. В динамике давления в периоды времени за несколько суток наблюдаются резкие изменения от 720 до 750 мм рт.ст. (рисунок 1). В СВАН-диаграммах проявляется периодизация порядка 10 суток. Периоды 2 суток, 1 сутки, 12 часов проявляются до 17.10.13 г., после этого времени они не проявляются (рисунок 2).

В ряде литературных источников описывается процесс изменения динамики температуры перед землетрясениями [9]. Для проверки этой закономерности нами были использованы данные о землетрясениях на Алтае, а также динамика температуры атмосферного воздуха и ОА радона. В результате был построены графики изменения изучаемых характеристик (рисунок 3). При этом на данных рисунках показано, что перед землетрясениями 24.11.2012 и 02.01.2013 гг. динамика изучаемых характеристик меняется. 24.11.12 г. температура начинает расти с -12℃ до -2℃, динамика радона понижается перед землетрясением и повышается после него. 02.01.2013 г. температура резко повышается перед землетрясением и затем снова понижается, объемная активность радона с сравнительно низкого уровня перед землетрясением повышается до 350 Бк/м^3. На приводимом далее рисунке стрелкой показаны моменты соответствующих землетрясений.

Исходя из полученных результатов, для поиска общих закономерностей в изменении изучаемых характеристик нами был использован метод наложенных эпох т.е. было произведено изучение изменения температуры и объемной активности радона непосредственно момент землетрясения, а также рассчитаны их значения до и после сейсмических событий.

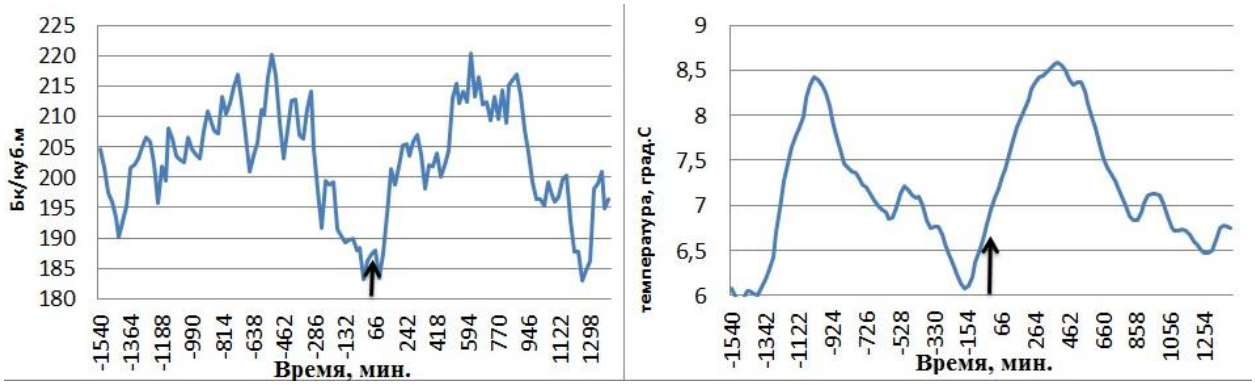


Рисунок 3 – Диаграммы средних значений эманации радона и температуры атмосферного воздуха в зависимости от времени до или после землетрясения (в минутах) в Алтае-Саянском регионе (период с 03.09.13 по 31.10.13 г. – 63 землетрясения).

Анализ распределения значений объемной активности радона во времени до и после землетрясения (63 землетрясения за период с 03.09.13 по 31.10.13 гг.) показал следующие закономерности (рисунок 2). Максимальное значение объемной активности радона за данный период наступает за 8,4 и 6,6 часа до землетрясения и через 9,5 часа после события. Температурные характеристики имеют следующие закономерности: максимум за 17,6 до землетрясения, минимум за 3 часа до землетрясения и максимум 6,6 часов после землетрясения.

Используя существующие данные, проанализируем динамику объемной активности радона за период с 02.04 по 02.05.15 года, т.е. практически за месяц перед землетрясением в Непале.

Произошедшее 25.04.15 г. землетрясение в Непале было одно из энергоемких сейсмических событий, произошедших на значительном удалении от территории Алтая, тем более нам было важно посмотреть существуют ли закономерности динамики объемной

активности на Алтае перед этим землетрясением. Отметим, что за наблюдаемый период по данным Алтае-Саянского филиала Геофизической службы СО РАН было зафиксировано 20 землетрясений на территории Алтае-Саянского региона, практически все они отразились повышением эманации радона: особенно это видно по отрезку времени с 05.04 по 08.04.15 г. когда произошли землетрясения в Казахстане и Кемеровской области. Этому повышению объемной активности предшествовало понижение наблюдаемых характеристик за 1-2 суток до наблюдаемого периода. В день, когда произошло землетрясение в Непале, произошло также землетрясение на Алтае, что может свидетельствовать о возможной связи этих землетрясений. Учитывая работу [4] о возможной роли Тибетского землетрясения в инициировании Чуйского землетрясения 2003 года на Алтае мы можем предположить, что данное землетрясение (25.04.15 г. 11:50) может быть связано с землетрясением в Непале. Необходимо отметить, что динамика объемной активности радона перед этим землетрясением также понижается с 250 до 150 Бк/куб.м (в период с 21 по 25.04.15 г.).

Используя введенное М.А. Садовским [5] понятие иерархически структурированной среды можно предположить, что взаимодействия структурных элементов среды в разных ее участках происходит в разной степени, исходя из динамики воздействия блоков пород друг на друга, пластичности пород и ряда других характеристик. При этом, при сильных воздействиях блоков, непосредственно перед разрушением происходит существенное растрескивание массивов пород, при этом происходит изменение геофизических параметров среды, выражающееся в повышение температуры, увеличении эманации радона не только в горных породах, но и происходит существенное изменение параметров атмосферы, в связи с выделением из недр газов и тепла. Это выделение может вызывать локальное формирование облачных масс, пространственно приуроченных к разломным структурам, из которых происходят эти эманации.

Исследования выполнены при поддержке при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (в соответствии с требованиями государственного контракта №14.577.21.0109)в Тульском государственном университете.

Литература

1. Пономарев В.С. Горные породы как среды с собственными источниками упругой энергии [Текст] / В.С. Пономарев // Проблемы нелинейной сейсмики. – М.: Институт Физики Земли, 1987. – С.50-64.
2. Шулейкин В.Н. О корреляции микросейсмических, гидрогеологических и атмосферно-электрических процессах [Текст] / В.Н. Шулейкин, А.М. Покарпов // Материалы Всесоюзного семинара «Нетрадиционные методы геофизического исследования неоднородностей в земной коре». М.: Институт физики земли, 1985. – С.124-125.
3. Дода, Л.Н. Космический мониторинг предвестников землетрясений [Текст] / Л.Н. Дода, Н.В. Новикова, Л.Н. Пахомов [и др.] // Наука в России. − 2009. − №6. − С. 30□37.
4. Дядьков, П.Г. Возможное влияние землетрясений в Северном Тибете и близ о. Хоккайдо (2003 г.) на процесс подготовки Алтайского землетрясения 2003 года [Текст] / П.Г. Дядьков [и др.] // Физическая механика. − 2006. − №9 (1). − С. 67-72.
5. Садовский, М.А. Сейсмический процесс в блоковой среде [Текст] / М.А. Садовский, В.Ф. Писаренко. − М.: Наука, 1991. − 96 с.

УДК 550.31; 550.8.08

РЕЗОНАНСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ КРУТИЛЬНЫМИ МАЯТНИКАМИ

С.А. Шопин, *sshopin@mail.ru*

ФБГОУ ВО Тульский государственный университет, г.Тула, Россия

Рассмотрена конструкция приборов – широкополосных градиентометров, используемых для систематических гравиметрических наблюдений в Тульском государственном университете. Приведены примеры специфических высокочастотных сигналов большой амплитуды, регистрировавшихся в прошлые годы в сентябре-октябре. Представлены характерные спектрограммы таких сигналов. Регистрация сигналов происходит из-за резонансного характера амплитудно-частотной характеристики крутильных систем.

RESONANCE EFFECTS IN HORIZONTAL TORSION PENDULUM EXPERIMENTS

S.A. Shopin, *sshopin@mail.ru*

Tula State University, Tula, Russia

It is considered construction of instruments (wideband gradiometers), used for systematic gravity monitoring in Tula State University. Several examples of specific high-frequency signals, registered in Septembers and Octobers during last years are shown. Typical spectrograms of such signals are presented. Registration of signals results from the resonant behavior of the gain-frequency characteristic of the torsional systems.

В Тульском государственном университете с конца 80-х гг. XXв. проводятся мониторинговые наблюдения с использованием специальных гравиметрических приборов градиентометрического типа, основанных на использовании асимметричного горизонтального крутильного маятника [1,2]. В настоящее время приборы используются как один из компонентов системы наземно-космического мониторинга предвестников землетрясений [3].

Основным элементом конструкции используемых приборов – широкополосных градиентометров (приборов ШГМ) – являются крутильные маятники типа весов Кулона или Кавендиша с асимметричной системой грузов (рис.1а). Крутильная система представляет собой коромысло 2, подвешенное за центр тяжести на нити 1. На концах коромысла закреплены грузы 3 и 4. Элементы крутильных систем выполнены из немагнитных материалов. Измерения проводятся на неподвижном основании (точка подвеса нити О неподвижна).

Используемая крутильная система является асимметричной: грузы 3 и 4 имеют различную конструкцию и массо-инерционные характеристики. Конструкция груза 3 набирается из металлических пластин.

Измеряемой величиной является угол закручивания нити 1 крутильной системы (угол поворота коромысла 2). величина которого для находящихся в эксплуатации приборов находится в диапазоне ±20°.

Каждый прибор ШГМ имеет несколько измерительных каналов (несколько крутильных систем), размещенных внутри заземленного металлического корпуса-экрана (рис. 1б).

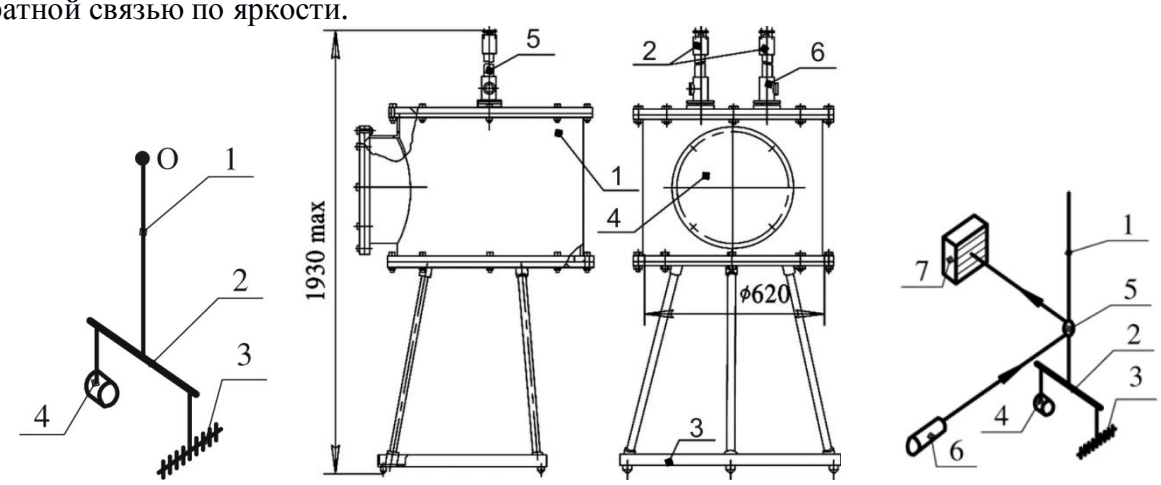
Коромысла с грузами находятся внутри рабочего объема корпуса 1, выполненного из толстой стали (толщина ~10-20 мм). Нити подвеса крутильных систем располагаются внутри штанг 5. Крепление нитей подвеса и установка нулевого положения крутильных систем осуществляется с помощью узла 2.

Каждая крутильная система снабжена оптоэлектронной системой, обеспечивающей измерение угла поворота коромысла и передачу информации в персональный компьютер. Элементы датчиков углов поворота располагаются в опорах штанг 6.

Принцип действия измерительной системы угла поворота показан на рис.1в. Измерение угла поворота угла осуществляется путем измерения освещенности фотодиода 7

отраженным от зеркальца 5 светом от источника света 6. Освещенность изменяется в зависимости от угла поворота зеркальца, жестко связанного с коромыслом крутильной системы. Такая схема измерения угла при определенных параметрах и расположении источника света и фотодиода оказывается нечувствительной к отклонениям нити подвеса от вертикали.

В качестве источников света 6 используются лазерные диоды или светодиоды с обратной связью по яркости.



а) б) в)

Рис. 1. а) Крутильная система прибора ШГМ: О – точка подвеса крутильной системы; 1 – нить подвеса; 2 – коромысло; 3 – груз сложной формы; 4 – груз-противовес; б) Конструкция корпуса-экрана прибора ШГМ-2: 1 – рабочий объем корпуса; 2 – узел крепления и регулировки крутильной системы; 3 – основание прибора; 4 – крышка рабочего монтажного окна; 5 – штанга; 6 – опора штанги; в) Принцип измерения угла закручивания нити: 1 – нить подвеса; 2 – коромысло; 3 – груз сложной формы; 4 – груз-противовес; 5 – зеркальце; 6 – светодиод; 7 – фотодиод

Крутильные системы приборов являются слабо демпфированными, их резонансные частоты находятся в районе единиц миллигерц.

В настоящее время в эксплуатации находятся три прибора: ШГМ-2, ШГМ-3 и ШГМ-4 (рис.2). Цифра в названии приборов обозначает число крутильных систем. Приборы ШГМ работают в круглосуточном режиме и их показания сохраняются в специальной базе данных с частотой дискретизации до 1 Гц (различна для разных приборов). Лаборатория мониторинга является отдельным изолированным помещением, измерения ведутся без участия оператора.

В работах [4,5] на экспериментальных данных показана чувствительность приборов к микросейсмике от удаленных сильных землетрясений, а также к быстрым вариациям атмосферного давления в пункте наблюдений. В работах [1,2,4,5] приведены примеры регистрируемых сигналов и рассмотрена их структура. В настоящей работе рассматриваются специфические ВЧ сигналы, зарегистрированные приборами.

8 декабря 2009г. начал регистрироваться ВЧ сигнал беспрецедентной мощности, наблюдавшийся вплоть до 15 декабря (рис.3,4). За время наблюдений с использованием систем ШГМ-3 и ШГМ-4 (с 2006г.) сигнал не имел аналогов на момент своего возникновения, значительно превосходя по амплитуде аномалии на любом временном интервале до своего появления (в течение 2006–2010гг.), поэтому данный сигнал был назван мега-аномалией.

Спектральный анализ (рис.5) показал, что мега-аномалия представляет собой широкополосный сигнал, имеющий похожую спектральную структуру на всех каналах приборов, в тоже время каждый из каналов выделяет в спектре составляющие, расположенные вблизи собственных резонансных частот (частот собственных колебаний). Спектральный состав мега-аномалии на интервале 13.12.2009–15.12.2009 несколько сдвинут в ВЧ область Кроме собственной частоты колебаний каждого канала спектр мега-аномалии

содержит также ряд выраженных составляющих на других частотах в диапазоне 10^{-2}–10^{-1} Гц – гармоник основной частоты ~10^{-2} Гц. В указанном частотном диапазоне лежат и собственные частоты колебаний крутильных систем, т.е. регистрация аномалий связана с резонансными эффектами.

а) б)

Рис. 2. а) Фотография лаборатории, б) корпус-экран прибора ШГМ-3: 1 – рабочий объем, 2 – устройство крепления и регулировки крутильной системы; 3 – крышка корпуса; 4 – основание прибора; 5 – крышка рабочего монтажного окна; 6 – штанга; 7 – опора штанги:

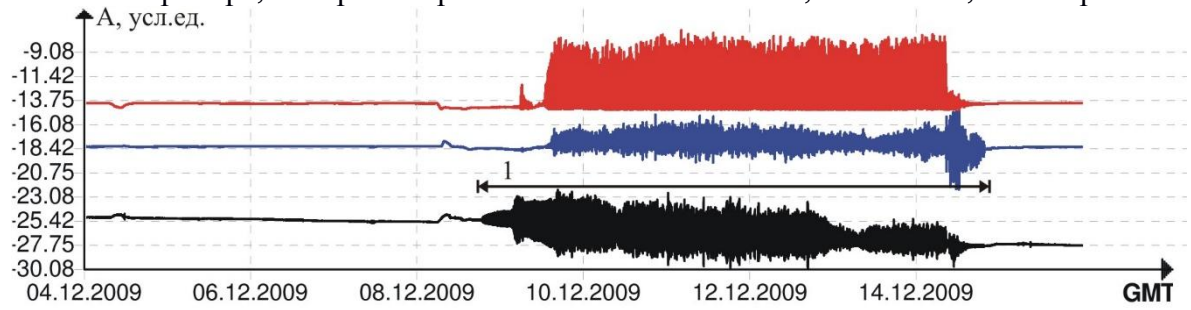


Рис.3 – Данные ШГМ-3 за период 04.12.2009–15.12.2009: 1 – ВЧ сигналы

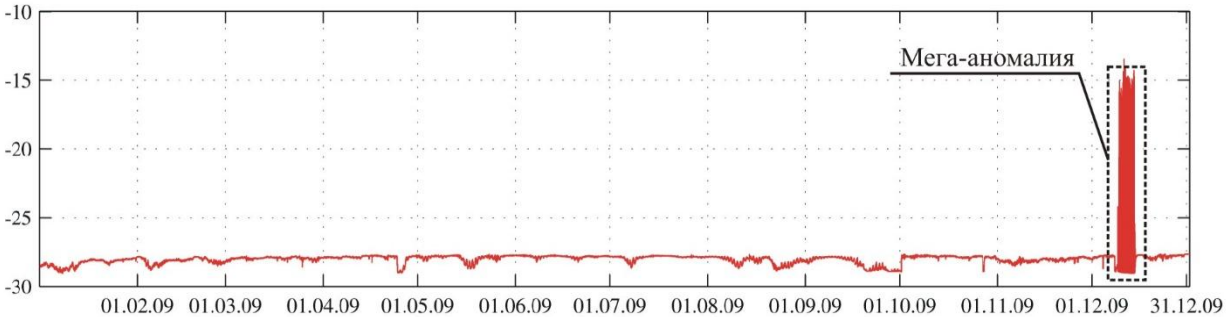


Рис.4 – Мега-аномалия на годовом графике ШГМ-3 за 2009г., канал 1

Спектральный анализ сигналов за 2006-2014гг. позволил выявить сигналы, имеющие линейчатый спектр – сигналы-аналоги частотной структуры мега-аномалии. Аналоги были найдены на следующих временных интервалах:

– в 2006г.: 18.10–19.10;
– в 2007г.: 19.09; 14.10–19.10; 29.10;
– в 2008г.: 16.09–20.09; 28.09–29.09; 29.10.
– в 2013г.: 27.09–30.09;

– в 2014г.: 21.10–22.10.

Пример спектрограммы сигнала-аналога показан на рис.6

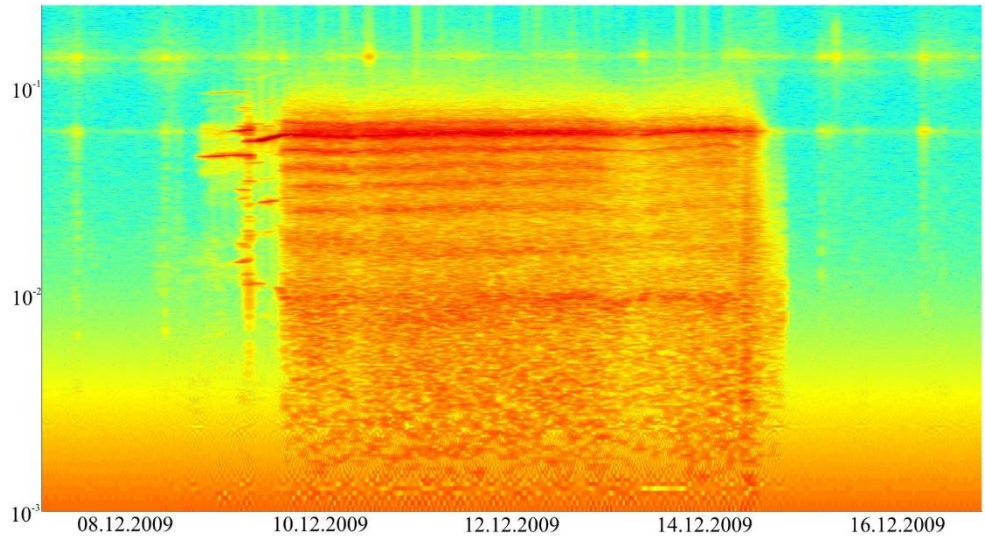


Рис.5 – Спектрограмма канала 3 прибора ШГМ-3

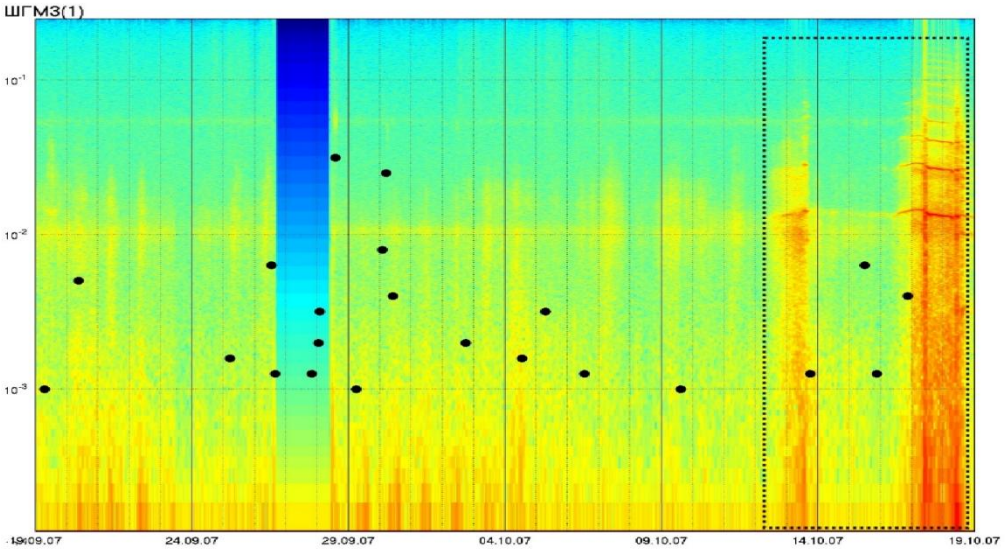


Рис. 6 – Спектрограмма канала 1 прибора ШГМ-3 на интервале 19.09.2007–19.10.2007г.

Мега-аномалия декабря 2009г. имеет аналоги по частотной структуре, хотя по своей интенсивности она аналогов не имеет. Несомненно, значительный интерес вызывает сопоставление временных интервалов аномалий с результатами измерений с помощью современных высокочувствительных гравиметров, выполняемых другими исследовательскими группами.

В 2013г. измерения с помощью приборов ШГМ проводились уже в сопровождении специального компьютеризированного барографа, разработанного автором статьи, что позволило изучить спектральный состав инфранизкочастотных вариаций атмосферного давления в период наблюдения аномалии и позволило проверить гипотезу о возможном метеорологическом генезисе наблюдавшейся аномалии. На рис.7-9 показаны аномалия 2013г. и результаты цифровой фильтрации данных барографа и ШГМ-3. Поведение отфильтрованных составляющих данных ШГМ-3 и барографа отличается, что позволяет утверждать, учитывая очень большую амплитуду аномалии, что аномалия 2013г. не связана с акустическими процессами в пункте наблюдений. Аналогии между аномалией 2013г. и показанными ранее осенними аномалиями, выявленными на временном интервале 2006–2014гг., позволяют предположить, что все указанные аномалии не связаны с акустическими

процессами, т.е. имеют неметеорологическое происхождение. Данное утверждение будет проверяться с помощью барографа с более высоким разрешением.

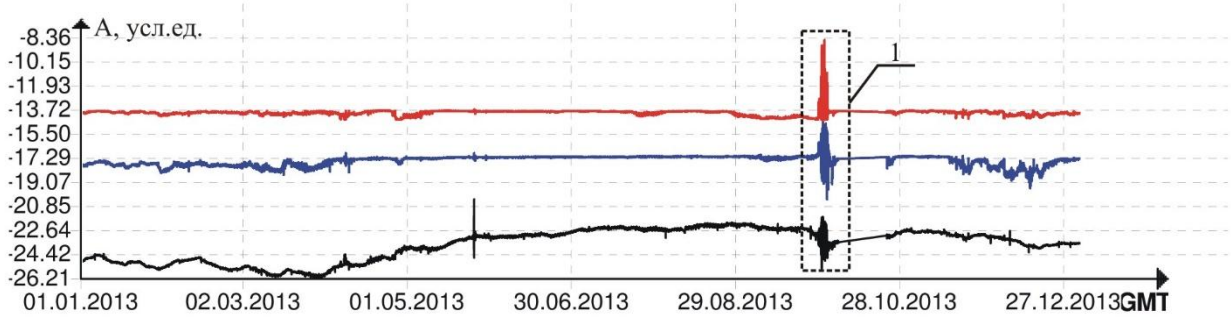


Рис. 7 – Данные ШГМ-3 за 01.01.2013–31.12.2013г.: 1 – аномалия

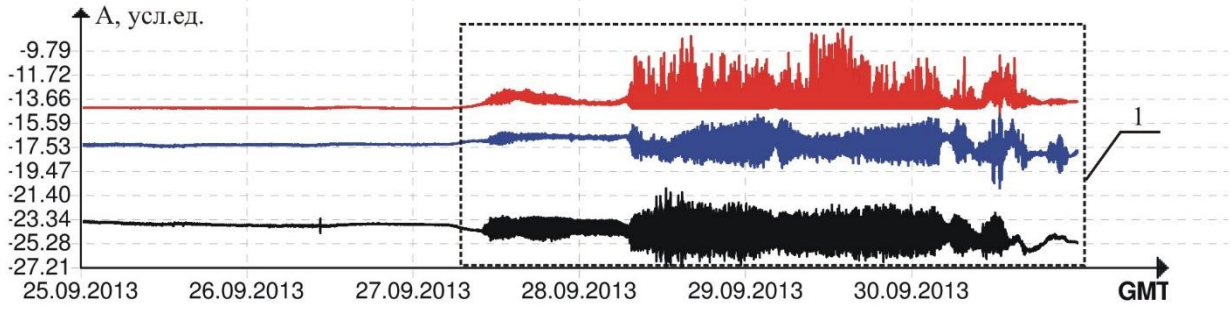


Рис.8 – Данные ШГМ-3 за 25.09.2013–30.09.2013г.: 1 – аномалия

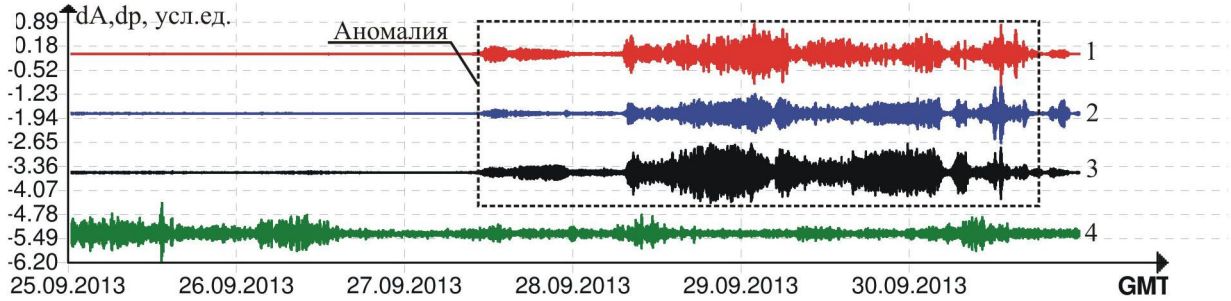


Рис.9 – Аномалия в данных ШГМ-3 и данные барографа за период 25.09.2013–30.09.2013г.: 1,2,3 – отфильтрованные сигналы ШГМ-3, 4 – отфильтрованные данные барографа.

Интересно отметить, что все найденные интервалы - аналоги привязаны к сентябрю-октябрю, что позволяет предположить, что появление подобных сигналов связано с прохождением планетой при движении по орбите определенной области космического пространства, в которой она подвергается какому-то специфическому воздействию.

Список литературы

1. *Мартынов О.В.* Концепция прогноза природных катастроф и практические результаты, полученные на основе аппарата нелинейной физики, математики и данных системы //Нелинейный мир.– 2008.– № 10.– Т. 6.– С. 579-615

2. *Шопин С.А.* О работах О.В. Мартынова по прогнозу землетрясений / Система «Планета Земля»: 200 лет Священному союзу.– М.: ЛЕНАНД, 2015.– 656с.– С.102–120

3. *Doda L.N., Dushin V.R., Natyaganov V.L., Smirnov N.N., Stepanov I.V.* Earthquakes forecasts following space- and ground-based monitoring // Acta Astronautica.– 2011.– V.69.– P.18-23

4. *Шопин С.А.* Микросейсмические и барические эффекты при измерениях с помощью горизонтальных крутильных весов / Система «Планета Земля»: XX лет Семинару «Система “Планета Земля”».– М.: ЛЕНАНД, 2014.– 608с.– С.343–355

5. *Шопин С.А.* Влияние микросейсм и вариаций атмосферного давления на измерительные системы на основе горизонтальных крутильных весов // Известия ТулГУ. Естественные науки. Вып. 1. Ч.1.– Тула, изд-во ТулГУ, 2014.– С. 249-263.

УДК 550.835

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ РАДОНОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ НЕГЛУБОКО ЗАЛЕГАЮЩИХ КАРСТОВЫХ ПОЛОСТЕЙ

А.К. Юрков, И.А. Козлова, А.Н. Антипин, *akyurkov@mail.ru*
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН

Аннотация. На лабораторных моделях экспериментально показаны изменения значений плотности потока радона через дневную поверхность при наличии включений. Полученные результаты могут быть использованы для обнаружения неоднородностей в верхней части геологического разреза, в частности, неглубоко залегающих карстовых полостей.

THE QUESTION CONCERNING THE APPLICATION OF RADON STUDIES SHALLOW KARST CAVITIES

A.K. Yurkov, I.A. Kozlova, A.N. Antipin, *akyurkov@mail.ru*
Federal state budgetary institution of science Institute of Geophysics Yu.P. Bulasevich Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. In laboratory models, it is shown experimentally change the values of the flux density of radon through the ground surface in the presence of inclusions. The results can be used to detect inhomogeneities in the upper part of geological section, in particular, shallow karst cavities.

О радоне с момента его открытия написано достаточно много. Рассмотрены практически все аспекты его применения в различных областях науки, техники и медицине. Его основное свойство – радиоактивность, с одной стороны негативно влияет на экологическую обстановку мест проживания социума, а с другой стороны может выступать помощником при решении различных геологических, экологических, бальнеологических задач. Например, излучение радона позволяет применять его в качестве терапевтического средства при лечении ряда заболеваний. Достаточно упомянуть ряд курортов, в которых в качестве лечебных процедур применяются радоновые ванны и радоновые ингаляции. Это такие широко известные курорты как Карловы Вары, Цхалтубо, Липовка, Белокуриха и др. Измерения почвенного радона являются прямым методом для поиска месторождений радиоактивного сырья, причем обладающим наибольшей глубинностью среди известных методов [1]. Широко используется радон при картировании тектонических нарушений, как выходящих на поверхность, так и скрытых толщей рыхлых отложений. В последние несколько десятков лет радоновые исследования применяются при изучении изменений геодинамической обстановки, связанной с подготовкой тектонических землетрясений или горных ударов. Изменения геодинамической обстановки прямо или опосредовано влияет на напряженно-деформированное состояние горных пород. Последнее приводит к изменению коэффициента эманирования горных пород и соответственно изменяется объемная активность почвенного радона. В ряде случаев радон может быть полезен при изучении неоднородностей верхней части геологического разреза. Выполняя площадные или профильные измерения плотности потока радона можно получить информацию о наличии неоднородностей, различающихся коэффициентом эманирования, по сравнению с вмещающими горными породами.

Известно, что поток радона через дневную поверхность в основном формируется слоем горных пород мощностью 6-10 метров. В случае нахождения в этом слое включений с иным коэффициентом эманирования, который зависит от структурных особенностей и содержания радия, должна измениться и плотность потока через дневную поверхность.

Одной из областей применения такого поведения плотности потока (ППР)радона может быть поиск неглубоко залегающих карстовых полостей. В случае незаполненной (воздушной) карстовой полости, над ней будет формироваться пониженная плотность потока радона. При заполнении полости глиной, для которой характерны более высокие содержания радия по сравнению с известняками или гипсами, с которыми обычно связаны карстовые

явления, над полостью будут отмечаться более высокие значения плотности потока радона. Даже при заполнении полости обломочным материалом материнского состава, также будут наблюдаться изменения плотности потока радона за счет изменения коэффициента эманирования.

Для проверки возможности использования вариаций плотности потока радона для обнаружения неоднородностей в верхней части геологического разреза, в Институте геофизики были проведены исследования на моделях, реализованных на лабораторном стенде. Стенд (Рис.1) представляет собой металлическую емкость в форме цилиндра (диаметр - 0,55 м, высота - 1,20 м), заполненную гранитным отсевом (фракция 1-5 мм), с удельной эффективной активностью Ra - 150 Бк/м^3. Для измерения объемной активности радона (ОАР) горизонтально, с двух сторон по диаметру вставлены воздухозаборники, состоящие из двух отрезков металлических трубок, герметично закрываемые с обоих концов. Снизу емкость герметично закрыта, сверху свободно сообщается с атмосферой. Для приближения модели к условиям реального геологического разреза, нижний слой отсева толщиной около 5 см заполнялся водой. Для уменьшения влияния на измеряемую объемную активность радона отбираемого объема проб воздуха, измерения проводились в конвективном режиме [2]. Поровый воздух забирался насосом из одного конца трубки, пропускался через измерительный прибор (Alpha Guard PQ 2000) и возвращался через другой конец трубки обратно в емкость, в точку отбора.

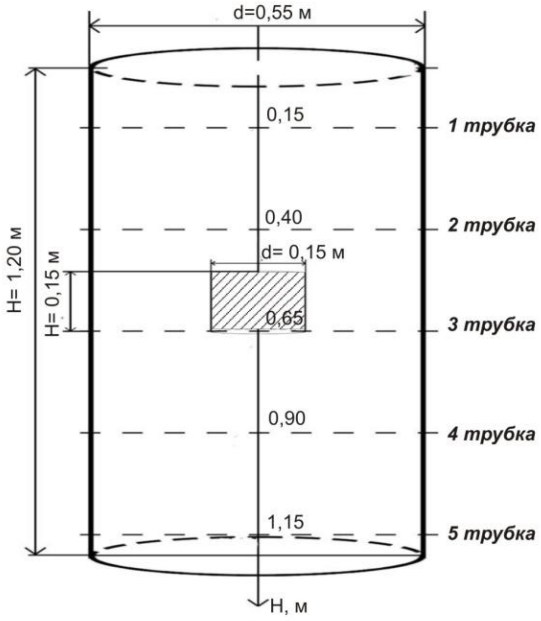


Рис.1. Лабораторный стенд для изучения влияния неоднородностей на плотность потока радона через верхнюю границу

Первая часть эксперимента состояла в измерении распределения объемной активности по вертикали вдоль осевой части емкости и плотности потока по горизонтали через открытую поверхность для однородной модели. Во второй части эксперимента в середину емкости помещалась цилиндрическая неоднородность (диаметр - 0,15 м., высота – 0,15 м), заполненная кварцевым отсевом (фракция 3-5мм) с нулевым содержанием радия. После установления равновесия с радием, как и в первом случае, выполнялся аналогичный комплекс измерений распределения объемной активности радона (ОАР) по вертикали и плотности потока радона (ППР) через верхнюю границу. Неоднородность предположительно имитировала карстовую полость, заполненную породой, не генерирующей радон. Плотность потока радона измерялась комплексом «Камера-01». Адсорберы располагались на верхней границе емкости по двум взаимно-перпендикулярным направлениям. На каждом профиле располагалось по 5 адсорберов.

На рисунке 2 приведен вертикальный профиль распределения ОАР по осевой части однородной модели и модели с неоднородностью. Приведенные результаты показывают существенное влияние неоднородности в масштабе модели на вертикальное распределение ОАР, которое и определяет величину плотности потока радона (ППР) через верхнюю (открытую) поверхность.

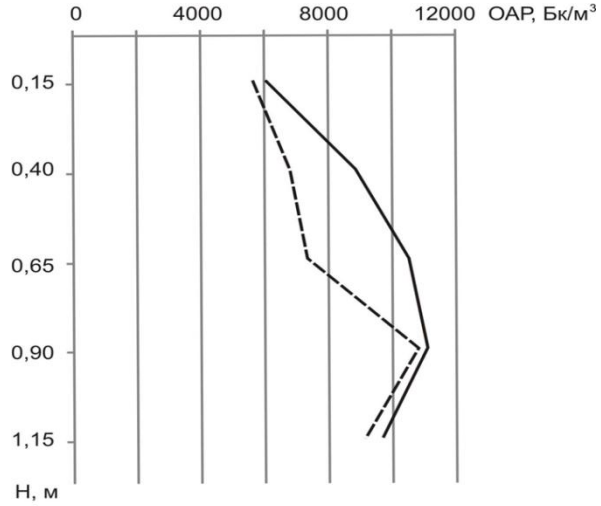


Рис.2 Вертикальный профиль распределения объемной активности радона (сплошная линия – однородная модель, пунктирная - модель с неоднородностью)

Изменение величины плотности потока радона для однородной модели и модели с неоднородностью приведены на рисунке 3.

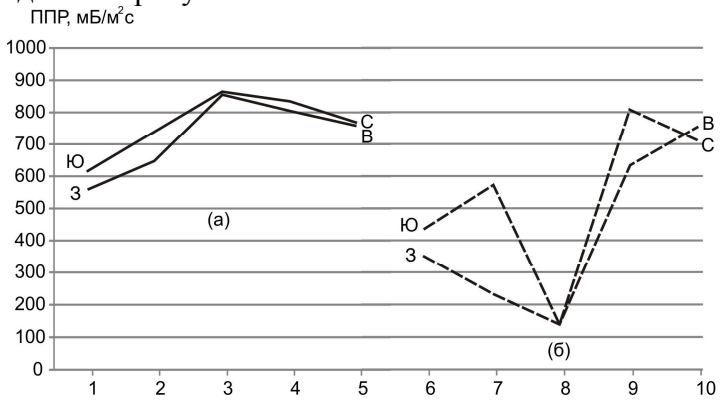


Рис.3. Распределение плотности потока радона через верхнюю границу для однородной модели (а) и модели с неоднородностью (б)

Наблюдаемые различия в плотности потока радона для этих случаев (даже с учетом одинаковых условий измерений на лабораторных моделях) подтверждает возможность получения дополнительной информации при изучении неоднородностей верхней части геологического разреза. Практическую целесообразность использования радоновых исследований необходимо подтвердить измерениями в естественных условиях на площадях с развитым и известным карстом. В ряде случаев классические методы дают неоднозначные результаты интерпретации и применение радоновых исследований, учитывая их простоту, экспрессность и иные физические предпосылки может оказаться полезным.

Работа выполнена в рамках проекта № 15-2-5-32 Программы УрО РАН.

Список литературы:

1. Новиков Г.Ф., Капков Ю.Н. Радиоактивные методы разведки. Л: Недра, 1965. 759 с.
2. Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К, Николаев В.В. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах. //Доклады РАН. 1996 .Т.346, №2. С.245-248.

ВЫДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД И ОЦЕНКА ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ (ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ В МАГНЕТИТАХ НА ТИПЫ РУД И ИХ ОБОГАТИМОСТЬ)

Е.А. Баженова, Н.А. Белоглазова, А.Г. Вдовин, И.И. Глухих, В.С. Иванченко
Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича, Екатеринбург
С.В. Калугина
Геологическая служба Валерьяновского рудоуправления, г. Качканар

За 2015 год совместно с сотрудниками геофизической службы Валерьяновского рудоуправления были отобраны образцы различных типов магнетитовых руд (Северный карьер, Западный карьер, Главный карьер, собственно Качканарское месторождение). Были отобраны труднообогатимые руды, легкообогатимые руды, руды с различным содержанием полезных компонентов и примесей, исследованы физические и магнитные свойства магнетитовых руд с различными содержаниями железа. В процессе исследований установлено, что на Гусевогорском месторождении от количества элементов-примесей в основном зависит остаточная магнитная намагниченность Jn. Индуцированная магнитная восприимчивость Ji в свою очередь, в основном, зависит от содержания титаномагнетита и внешних наложенных физико-химических процессов. Также были также выполнены 3-х компонентные наземные измерения и измерения в скважинах. При этом, основное внимание было уделено расчету магнитных характеристик горных пород по результатам трехкомпонентных измерений геомагнитного поля и величины магнитной восприимчивости. На основе аппроксимации оруденения в виде горизонтальных пластов различной мощности и простирания предложены формулы для расчета векторов естественной полной намагниченности (величина и направление).

По скважинам, в которых измерения были выполнены ранее, рассчитано распределение полной и остаточной естественных намагниченностей. Пример измерений в одной из скважин приведен на рис. 1.

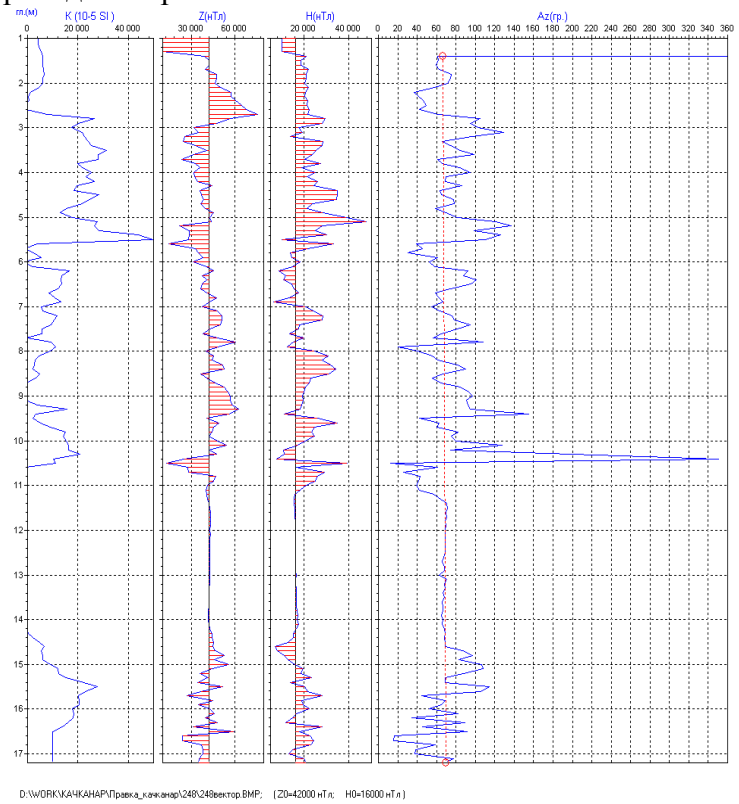


Рис.1. Результаты измерений с трехкомпонентным магнитометром в буровзрывной скважине.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что естественная остаточная намагниченность, в основном, противоположна по направлению индуцированной. Вследствие этого, полная естественная намагниченность, обуславливающая величины аномалий геомагнитного поля, меньше намагниченности,
определенной по величине магнитной восприимчивости. Кроме того, по результатам измерений с комплексным трехкомпонентным скважинным прибором возможно по результатам интерпретации выделение зон различных по фактору Кенигсбергера.

Прим. Общая намагниченность (J общ.) является векторной суммой и состоит из остаточной магнитной восприимчивости (In) и индуцированной магнитной восприимчивости (Ji):

$$Jобщ. = Jn + Ji$$

Та магнитная восприимчивость χ, которая в настоящее время измеряется в карьерах, характеризует свойство веществ намагничиваться в магнитных полях; является коэффициентом пропорциональности в формуле:

$$Ji = \chi H$$

H — напряженность намагничивающего магнитного поля, напряженность (H) современного поля Земли равна ~ 50 А/м.

Как определить остаточную намагниченность для выделения непосредственно в карьере участков, отличающихся по содержанию элементов-примесей в блоках, подготовленных для отработки.

На сегодняшний день есть два пути решения этого вопроса.

Путь первый. На подготовленном к отработке участке проводить 3-х компонентные магнитные измерения в опорных, а также во всех буро- взрывных скважинах. При этом скважинным магнитометром измеряется магнитная восприимчивость χ, вертикальная составляющая магнитного поля Hz, и две горизонтальные составляющие. После обработки информации получаем сведения о распределении естественной остаточной намагниченности Jn по взрывному блоку. Информация о магнитной восприимчивости χ используется стандартно. Однако, скважинный 3-х компонентный магнитометр пока не сертифицирован (работы по его сертификации ведутся совместно с Институтом метрологии и требуют определённых денежных вложений). Проведя сертификацию скважинного магнитометра, можно будет на его базе организовать в карьере геофизические измерения, и зная χ, и рассчитав Jn, можно будет более корректно определять содержание железа непосредственно не карьере.

Путь второй. Опираясь на те сертифицированные, стандартные измерения χ , которые на сегодняшний день проводятся в карьере с помощью измерительной станции «Карьер -2М», можно вычислить J общ. Проведя дополнительно наземную магнитную съёмку с помощью наземного магнитометра, можно определить Ji, рассчитать Jn, и выделить зоны повышенных содержаний элементов примесей. Опять же, зная χ и Jn, можно будет вводить поправки за типы руд при определении содержание железа непосредственно не карьере.

Есть ещё Третий путь. Для оценки содержания железа на участке ещё до бурения, так сказать, на перспективу, можно использовать измерения индуктивности методом незаземлённой петлёй (частота перемагничивания до 1000 Гц). Работы, проведённые на этом месторождении за последние несколько лет показали возможность использования этой методики, но в настоящее время, естественно, необходимы опытно методические работы.

В принципе, те геофизические исследования по определению содержания железа, которые в настоящее время проводятся в карьерах Качканарского ГОКа, полностью соответствуют общепринятой методике, и выполняются на высоком профессиональном уровне. Однако то, что сделано на сегодняшний день сотрудниками РАН, это начало определённых работ, ведущих к повышению точности определения содержания магнетитового железа, полезных компонентов в качканарских рудах, предварительной оценки технологических характеристик

руд и, как следствие, к удешевлению конечного продукта. Очевидно также, что проведение этих работ невозможно без тесного сотрудничества геологической службы Валерьяновского рудоуправления и сотрудников РАН.

Работа выполнена по Проекту Президиума УрО РАН № 15-11-5-9 «Изучение петрофизических особенностей титаномагнетитовых и магнетитовых руд (в образцах и в естественном залегании) месторождений, являющихся объектами стратегического сырья».

УДК 550.832

ВОЗМОЖНОСТИ ЧЕЛНОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СКВАЖИННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

***Е.А. Баженова**, Bazenova_Jena@mail.ru*
ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург

Представлена новая технология исследования скважин. Показана эффективность методики челночного каротажа при изучении современной геодинамической обстановки исследуемого района. Приведены примеры использования челночного каротажа в одной из скважин на железорудном месторождении Северо-Тараташского участка (Южный Урал).

THE NEW TECHNOLOGY RESEARCH OF WELLS IN THE REGIME OF CYCLICAL LOGGING

***Evgenya Bazenova**, Bazenova_Jena@mail.ru*
Institute of geophysics Ural Branch of Russian Academy of sciences, Ekaterinburg

Presents a new technology research in wells. Shows efficiency of the methodology of the cyclical logging in the study of modern geodynamic setting the investigated area. Given an examples of the use of the cyclical logging in one of the wells in the iron-ore deposit North-Taratashskogo area (Southern Urals).

К настоящему времени накоплен большой объем информации о динамике геофизических полей Земли и связи ее с изменением напряженно-деформированного состояния геологической среды. Наибольший объем таких исследований выполнен для районов с активной тектоно-вулканической деятельностью, к которым относится Камчатский полуостров. Однако, такая информация становится не менее актуальной и в относительно тектонически спокойных районах при наличии там важных стратегических объектов, таких как атомные электростанции, подземные хранилища отходов ядерного производства, шахты и рудники, различные шламо-отстойники и т. д. Для контроля за геодинамической ситуацией в районе таких объектов создаются геодинамические полигоны, на которых проводятся регулярные измерения геофизических полей. На шахтах и рудниках организуются службы прогноза и мониторинговых наблюдений для обеспечения безопасности горнопроходческих работ. Комплекс геофизических методов для различных геодинамических ситуаций может меняться.

В районах разработки и добычи полезных ископаемых нередки случаи проявления горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений, что влечет за собой экономические и человеческие потери. Поэтому проблема оценки изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, прогноз и предупреждение удароопасности приобретает особую остроту. Различия в механизмах геодинамических явлений, энергии и степени воздействия на окружающую среду определили различные подходы к оценке напряженно-деформированного состояния таких массивов и прогнозу динамических явлений в них.

Отличительной особенностью рудных месторождений является их генетическая приуроченность к узлам тектонических нарушений, что обуславливает блочное строение массивов горных пород с различными условиями распределения естественных напряжений, образующих зоны сжатия, растяжения и сдвига.

Установлено, что процесс формирования электромагнитного излучения (ЭМИ) отражает динамику зарождения и развития структурного разрушения пород. При этом процесс излучения носит импульсный характер: по мере перехода процесса разрушения с низшего энергетического уровня на более высокий энергетический уровень возрастают параметры ЭМИ (число импульсов, напряженность) [1]. В то же время, способность горных

пород излучать акустические импульсы используется для получения информации о неоднородности, нарушенности, напряженном состоянии горных пород, а так же развивающихся в земной коре динамических процессах. В горных породах при хрупком разрушении геоакустическая эмиссия (ГАЭ) обусловлена развитием микро- и макротрещин. По ГАЭ оценивают ударопрочность горных пород, контролируют состояние массива пород и процессы разрушения.

Изучение связи между ЭМИ и ГАЭ в скважинах позволяет не только понять механизм природы процесса, но и охарактеризовать динамические свойства трещиноватой среды, определить какой из ее параметров, проявляющихся в полях различной физической природы, является доминирующим и ответственным за наблюдаемый процесс. Учитывая иерархичность геосреды на разных масштабных уровнях, изучение связи ГАЭ и ЭМИ дает возможность получить дополнительные данные при изучении современных геодинамических процессов [2].

Наибольший объем информации о геодинамическом состоянии района и динамике его развития можно получить на основе записи вариаций сигналов разных геофизических полей (ГАЭ, ЭМИ) и определении их взаимосвязи. Наиболее интересными для режимных наблюдений можно считать точки, где при каротаже отмечались аномальные значения одного или нескольких измеряемых геофизических полей. Проведение мониторинга геоакустической и электромагнитной эмиссий в скважине одновременно в разных частотных диапазонах, позволяет получать новую информацию о динамике зарождения и развития структурного разрушения пород. Выделение динамически активных зон является актуальной задачей, имеющей практическое значение, как при бурении скважин, так и изучении тектоники месторождений.

Проведение первичных и повторных измерений геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения показали, что амплитуда сигналов этих полей не постоянна во времени. Было принято решение, для оценки изменения современной геодинамической обстановки горных пород, проводить исследования скважины не только в режиме обычного каротажа, но и в режиме каротажа с перекрытием нескольких точек по стволу скважины в течение нескольких часов. То есть, после проведения первичного каротажа выбирается определенный участок в скважине, вызвавший наибольший интерес, как по геологическим данным, так и по результатам исследования ГАЭ и ЭМИ. Этот участок разбивается на несколько равных частей с контрольными точками на границах. Между контрольными точками ведется каротаж. На контрольных точках производятся краткосрочные режимные измерения. Измерения могут длиться от 2 часов и более, в зависимости от времени, выделенного на каротажные работы. Эта методика получила название челночного каротажа.

По данной методике были проведены измерения в нескольких скважинах. На рисунке 1 приведен пример исследования в скважине, пробуренной на железорудном месторождении Северо-Тараташского участка (Южный Урал).

По геолого-геофизическим данным, рудное тело залегает в интервале глубин 288-376 м. Оно представлено кварцитами с магнетитовым оруденением. Верхняя часть оруденения до глубины 328 м довольно неоднородна по составу, а нижняя (328-376 м) представлена плотными магнитными породами. По диаграмме ЭМИ на частоте 45 кГц (F1) на глубинах 288, 320 и 375 м четко отмечаются контакты вмещающих пород с рудным телом. Основной особенностью измеренных значений ГАЭ в диапазонах частот 100-500 Гц (H1) и 500-5000 Гц (H2) является их стабильность во всем интервале исследований, тогда как в интервале глубин 288-320 м наблюдается повышенный уровень акустической эмиссии частотного диапазона 2500-5000 Гц (H4). Это говорит о том, что данный интервал, представленный магнетитовым оруденением, имеет отличные от остального разреза прочностные свойства и меньшую плотность, что также было отмечено в процессе проходки скважины.

Для проведения измерений по методике челночного каротажа был выбран участок с 263 м до 323 м, с пятью контрольными точками на глубинах 263 и 278 м - в кварцитах, на глубинах 293 м, 308 и 323 м - в рудном теле (рис. 2).

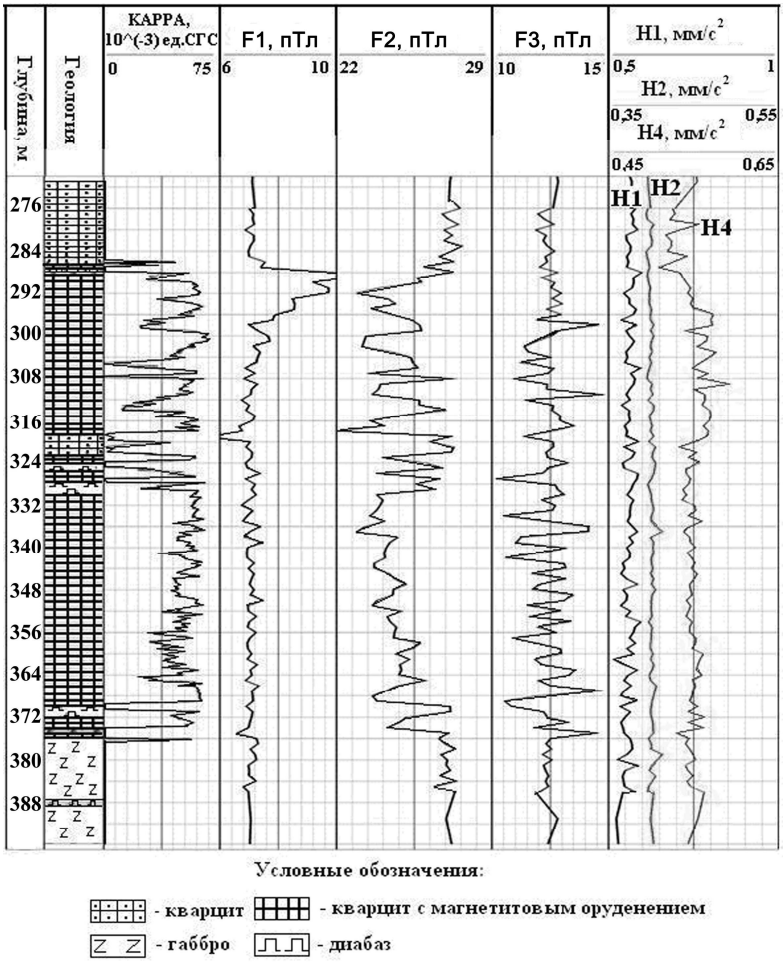


Рис.1. Результаты комплексных исследований магнитной восприимчивости, геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в скв. №1
(Северо-Тараташский участок, Южный Урал).

Зона кварцитов на глубинах 263 м и 278 м является динамически спокойной зоной. Здесь не проявляется никакой активности ни по ЭМИ, ни по ГАЭ. Интервал глубин 285-298 м, судя по данным каротажа электромагнитного излучения на частоте 45 кГц, является динамически активной зоной с признаками зарождения и развития структурного разрушения пород. Действительно, при режимных наблюдениях на контрольной точке 295 м наблюдаются высокоамплитудные сигналы, как в области ЭМИ (F1), так и, не отмеченные при каротаже во всех частотных диапазонах, сигналы ГАЭ. Данный результат может свидетельствовать о процессах разрушения горных пород спонтанного характера, которые являются квазипериодичным во времени. Вследствие чего, данный процесс не отразился на каротажных диаграммах ГАЭ, но проявился при режимных наблюдениях (см. рис.2). В рудной зоне (308 м) наблюдается пассивность как сигналов ГАЭ, так и сигналов ЭМИ всех частотных диапазонов. На глубине 323 м наблюдается стабильность значений ЭМИ во всех частотных диапазонах, но наблюдаются локальные аномалии ГАЭ, обусловленными, скорее всего, контактом пород.

Таким образом, в целом геологическую среду в районе скв. №1 можно охарактеризовать как динамически пассивную. Наибольшая активность ЭМИ и ГАЭ наблюдается, прежде всего, в приконтактовых зонах и зонах метаморфизованных пород.

В результате применения методики челночного каротажа появляется возможность за достаточно короткий период времени, что особенно актуально в районах разработки месторождений, выявить динамику изменения сигналов геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения геологической среды околоскважинного пространства не только по оси скважины, но и во времени на каждой контрольной точке. Это позволяет не только разделять геологический разрез на динамически активные и пассивные участки, но

изучать их характер во времени. Данная информация позволяет оценивать на качественном уровне степень нарушенности горных пород и прогнозировать возможные участки обрушений ствола скважины и может использоваться при контроле за техническим состоянием скважин и проектировании горных выработок.

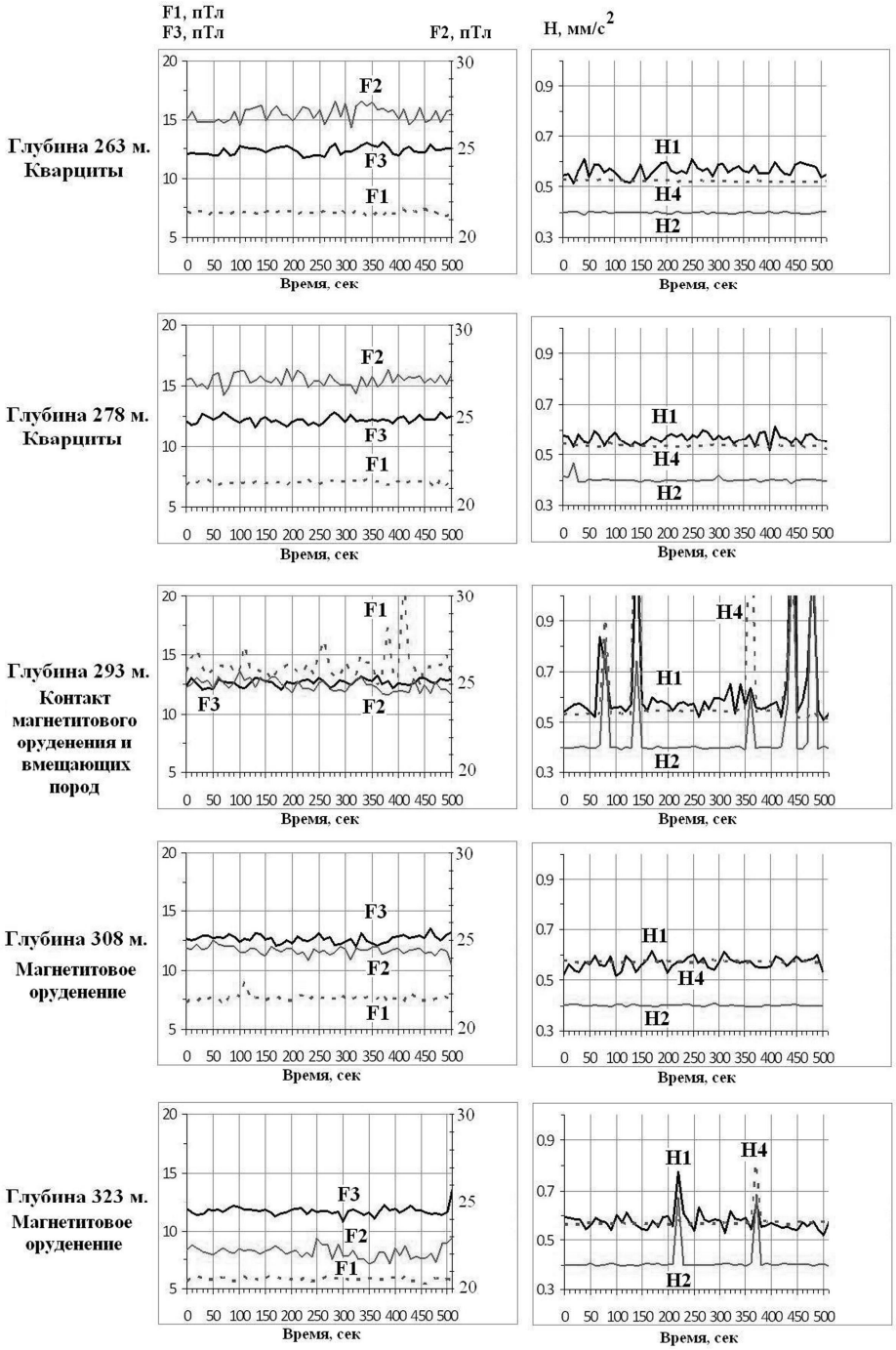


Рис.2. Результаты краткосрочных режимных наблюдений в скв. №1 (Северо-Тараташский участок, Южный Урал).

Работа выполнена при поддержке проекта 15-2-5-25 Программы УрО РАН.

Литература

1. Троянов А.К., Дьяконов Б.П., Мартышко П.С., Астраханцев Ю.Г., Начапкин Н.И., Гаврилов В.А., Белоглазова Н.А. Сейсмоакустическая эмиссия и электромагнитное излучение трещиноватых пород в скважинах // ДАН. 2011. Т. 436. №1, с. 118-120.

2. Астраханцев Ю.Г., Белоглазова Н.А., Троянов А.К., Глухих И.И., Вдовин А.Г. Скважинные исследования динамического состояния горных пород с использованием новой аппаратуры // Уральский геофизический вестник, г. Екатеринбург, том 2, 2013, с. 4-12.

УДК 550.832

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК ИНДИКАТОР МАСИВНОГО МАГНЕТИТОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ

А.Г. Вдовин, *agvd@bk.ru*
ИГф УрО РАН, г. Екатеринбург

Аннотация. Приведены результаты измерений электромагнитного излучения в скважинах Северо-Тараташского и Восточно-Тарутинского железорудных месторождениях. Показана связь сигналов электромагнитной эмиссии с данными магнитной восприимчивости на участках массивного магнетитового оруденения.
Ключевые слова: электромагнитное излучение, каротаж, магнитная восприимчивость, железорудное месторождение.

ELECTROMAGNETIC RADIATION AS INDICATOR OF MASSIVE MAGNETITE MINERALIZATION

A.G. Vdovin, *agvd@bk.ru*
Institute of Geophysics, The Ural Branch of Russian Academy of Science, Ekaterinburg

Summary. Shows the results of measurements electromagnetic emussion in wells North-Taratashskogo and East-Tarutino iron-ore deposits. Illustrates the relationship of signals electromagnetic emission with data of magnetic susceptibility in the areas of massive magnetite mineralization.
Key words: electromagnetic radiation, logging, magnetic susceptibility, iron-ore deposit.

Основой геофизических исследований на железорудных месторождениях являются магнитные методы. Для подсечения скважинной рудного тела служит измерение магнитной восприимчивости. Привлечение нетрадиционных методов геофизических исследований может дать не только дополнительную информацию, но и существенно повысить изученность массива горных пород. Одним из таких методов может выступать измерение электромагнитного излучения (ЭМИ).

Литосфера является сложной слоисто-блоковой моделью и все деформационные явления происходят в переходных между блоками ослабленных зонах. Поведение вещества этих зон изменяется от одной стадии лавинно-неустойчивого трещинообразования к другой. [1]. Граница раздела двух сред “руда - вмещающая порода” своего рода и является такой зоной. В естественных условиях ЭМИ возникает в больших объемах пород так, что радиус приема сигнала может составлять десятки метров и на его предельные значения будут накладывать ограничение не только геометрическое убывание амплитуд сигналов от отдельных источников, но и затухание за счет электропроводности среды, создавая для импульсных сигналов объемный фильтр низких частот. Следовательно, учитывая высокую электропроводность магнетита, можно предположить, что на контактах и вне рудного тела уровень ЭМИ будет отличаться по амплитуде от железорудного слоя.

Электромагнитное излучение возникает за счёт колебания свободных зарядов в кристаллической решётке минералов. Возбуждение зарядов происходит под действием колебаний ионов решётки при её деформировании. Т.е. в процессе трещинообразования возникают электрические заряды. В объеме геосреды это создает интегральный сигнал, который и является характеристикой ЭМИ.

Эмиссионный механизм не исчерпывается разрывами-трещинами. Породы можно рассматривать как систему, состоящую из твердого скелета и заполняющего его флюида (нефть, вода, газ), находящуюся в термодинамическом равновесии. Эмиссия может возникать под действием меняющихся нагрузок за счет трения по шероховатым

поверхностям разрывов, множества сдвигов. Отмеченная ЭМИ отражает разнообразные и сложные процессы в породах, включая околоскважинное пространство.

Для измерений использовалась аппаратура МЭШ-42 [2], разработанная в Институте геофизики УрО РАН. Данная аппаратура позволяет регистрировать электромагнитные сигналы на частотах 45 кГц (F45), 70 кГц (F70) и 120 кГц (F120).

Были проведены измерения в скважинах, пробуренных на Северо-Тараташском железорудном месторождении (Южный Урал). На рис.1а представлен геолого-геофизический разрез по скважине №1 и результаты геофизических исследований. По геологическим данным рудное тело представлено кварцитами с магнетитовым оруденением, а вмещающие породы - кварцитами, габбро и диабазами. В интервале глубин 288-376 м по диаграмме магнитной восприимчивости рудное тело отбивается четкой интенсивной аномалией. Исходя из данных каппометрии, верхняя часть оруденения, до глубины 328 м, довольно неоднородна по составу, а нижняя (328-376 м) представлена плотным массивным оруденением. Наибольшее соответствие кривой магнитной восприимчивости наблюдается с кривой ЭМИ на частоте 70 кГц, по которой рудное тело четко выделяется резким понижением «фонового» уровня. По диаграмме ЭМИ на частоте 45 кГц на глубинах 288, 320 и 375 м уверенно отмечаются контакты вмещающих пород с рудным телом. Аномально высокий уровень F45, на глубине от 286 до 298 м, можно объяснить как тектонически нарушенный интервал с протекающими процессами интенсивного трещинообразования. Это так же косвенно было отмечено в процессе проходки скважины и при отборе керна.

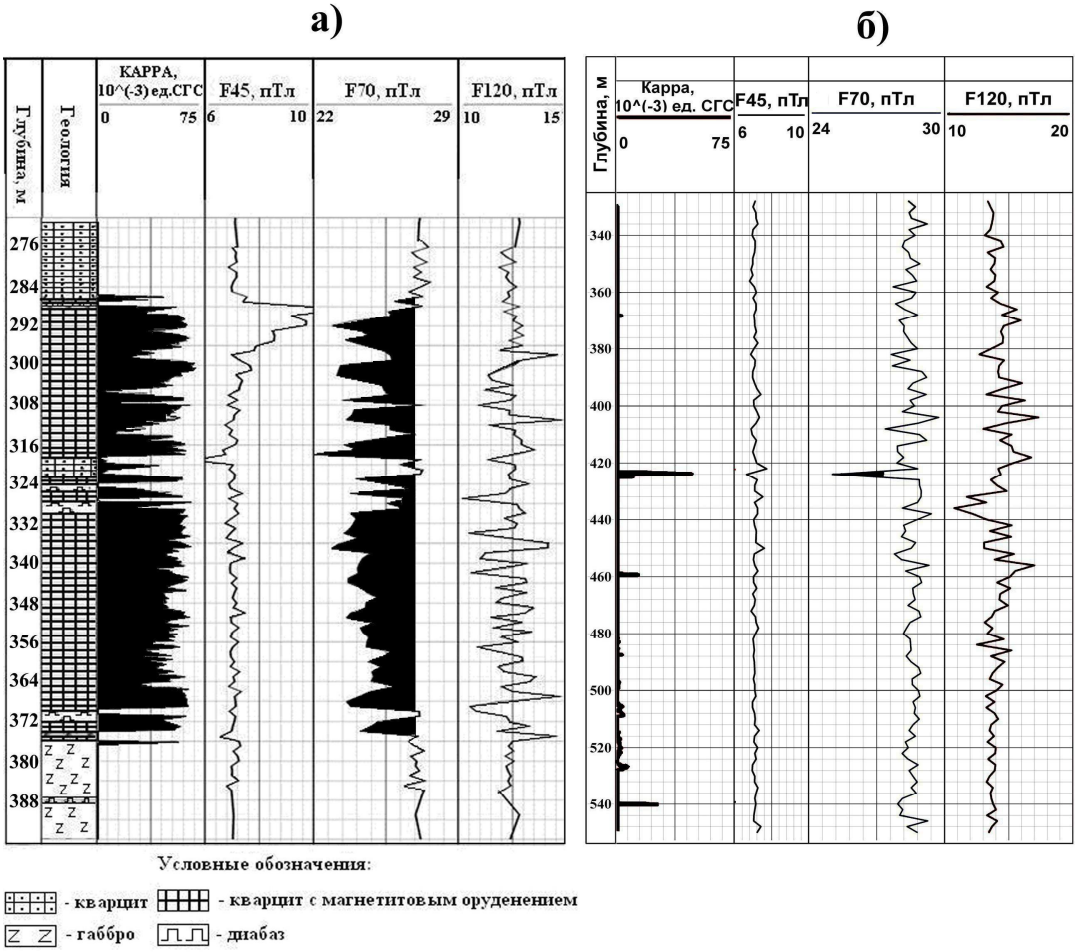


Рис.1. Фрагмент комплексных исследований на Северо-Тараташском железорудном месторождении (Южный Урал): а) в скважине №1; б) в скважине №2

Измерения, проведенные в скважине №2, находящейся на одном профиле со скважиной №1, показали аналогичные результаты (рис.1). По данным скважинной магнитометрии выделяются небольшие участки магнетитовой вкрапленности и один узкий

пласт мощностью 1 м массивного оруденения на глубине 423 м. Анализ измеренных параметров показал, что электромагнитное излучение изменяется только на участках массивных руд, никак не проявляясь при этом в зонах вкрапленности магнитных минералов. Так, в скважине №1, даже маломощный пласт массивной руды выделяется по значениям F70.

В скважине на Восточно-Тарутинском месторождении (республика Казахстан), был проведен каротаж ЭМИ и каппометрии (рис. 2). По геологическим данным, в интервале 85-113 м залегают слои массивного оруденения.. По измерениям электромагнитного излучения на частоте 45 кГц достаточно отчетливо выделяются интервалы соответствующие оруденению. Некоторое снижение разрешающей способности ЭМИ по сравнению с данными каротажа магнитной восприимчивости, прежде всего, связано с различным шагом наблюдения. Каротаж электромагнитного излучения проводился с шагом 1 м, а значения каппы измерялись с дискретностью 0,1 м. Следует отметить достаточно высокое соответствие кривых каппометрии и ЭМИ, что указывает на корреляцию полученных данных в скарн-магнетитовом оруденении

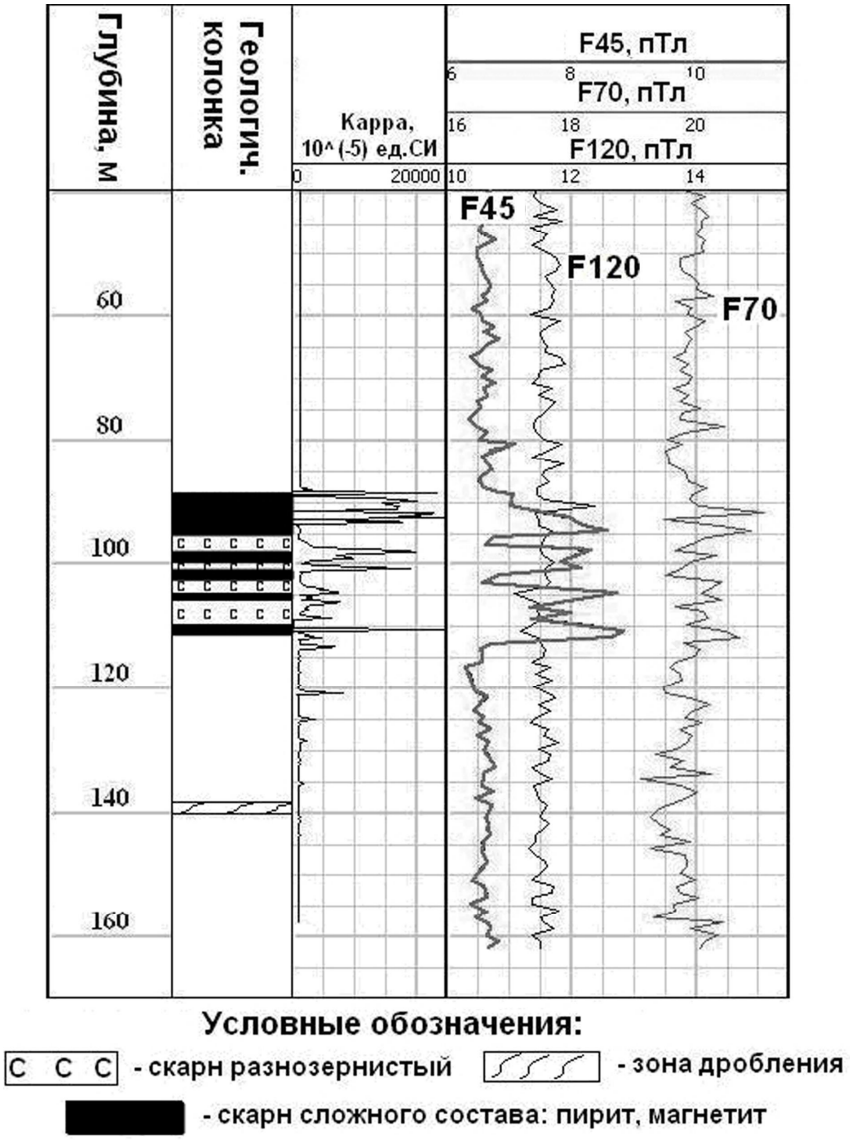


Рис.2. Результаты комплексных исследований магнитной восприимчивости и электромагнитного излучения в скважине на Восточно-Тарутинском месторождении

Измерения, выполненные в двух близлежащих скважинах, показали аналогичные результаты.

Отражение в полученных данных основных черт геологического строения железорудных месторождений свидетельствует об эффективности применения каротажа электромагнитного излучения. Из проведенных исследований можно сделать вывод, что, на генетически разных месторождениях, богатые руды отмечаются аномальными отклонениями от «фонового» уровня. Это говорит о связи ЭМИ с магнитной восприимчивостью пород на участках массивного оруденения.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РАН 15-2-5-25 и проекта РАН 15-11-5-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левшенко В.Т. Сверхнизкочастотная электромагнитная эмиссия литосферного происхождения. Автореферат диссертации доктора физ.-мат. наук. ОИФЗ. М. 1995.

2. Ю.Г. Астраханцев, Н.А. Белоглазова, Е.А. Баженова, А.Г. Вдовин, А.К. Троянов. Аппаратурно-програмный комплекс для скважинных исследований напряженно-деформированного состояния среды // НТВ Каротажник, №239, 2014, с.39-51

УДК 550.83.017

ПОСТРОЕНИЕ 2D ПЛОТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ С УЧЕТОМ УСЛОВИЯ ИЗОСТАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА ГЛУБИНЕ НА ПРИМЕРЕ ПРОФИЛЯ КВАРЦ

Д.Д. Бызов, А.Г. Цидаев, Н.В. Кошелева

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. В работе рассматривается оригинальная поэтапная методика для построения двумерных слоисто-блоковых плотностных моделей вдоль исследуемых профилей с использованием сейсмических разрезов различной протяженности и глубины. Блоки ниже границы Мохоровичича выделяются исходя из условия изостатической компенсации на глубине 80 км.

Ключевые слова: двумерная обратная задача гравиметрии, гипотеза изостатической компенсации, литостатическое давление.

METHOD FOR CONSTRUCTION 2D DENSITY MODEL OF UPPER MANTLE IN CONDITIONS OF ISOSTATIC COMPENSATION AT THE DEPTH

D.D. Byzov, A.G. Tsidaev

Institute of Geophysics, UB of RAS, Ekaterinburg

Abstract. In this paper, the stepwise methodology for constructing two-dimensional block-layered density models along studied profiles using seismic sections of different length and depth was considered. Blocks below the Moho was allocated based on the condition of isostatic compensation at a depth of 80 km.

Key words: 2D inverse gravimetric problem, condition of isostatic compensation, lithostatic pressure.

Введение

В работе представлена оригинальная поэтапная методика для построения двумерных слоисто-блоковых плотностных моделей вдоль исследуемых профилей с использованием сейсмических разрезов различной протяженности и глубины. Ниже границы Мохоровичича до глубины 80 км выделяются блоки, исходя из условия изостатической компенсации на этой глубине. Применяемый математический аппарат опирается на решение прямых и обратных задач гравиметрии. Обработка и построения проводятся в прикладных программах, созданных авторами. Их использование исключает влияние субъективного фактора интерпретации на всех этапах промежуточных расчетов, что важно для геолого-геофизического анализа полученных результатов. Методика применена для построения двумерных плотностных моделей вдоль 6 профилей в области Тимано-Печорской плиты [1].

Предлагаемая методика подробно рассматривается на примере профиля Кварц.

1. **Построение плотностной слоисто-блоковой модели начального приближения на основе имеющейся скоростной модели.**

Для перехода от сейсмической модели к плотностной в качестве границ слоев и блоков выбираются изолинии скорости таким образом, чтобы сохранить основные структурные особенности региона. Переход к параметру плотности осуществляется по эмпирической зависимости «скорость-плотность», полученной для исследуемой территории [2]:

$$\sigma(V) = \begin{cases} 0.113V + 2.034, & 2.35 \le V < 5 \\ 0.2V + 1.6, & 5 \le V < 7.75 \\ 0.25V + 1.3, & 7.75 \le V < 8.5 \end{cases}$$

В выбранных границах плотность усредняется и полученный разрез принимается в качестве начальной плотностной модели. Модель строится до уровня изостатической компенсации на глубине 80 км.

2. Подбор плотностей в земной коре и средней плотности верхней мантии с помощью решения линейной обратной задачи.

Двумерная линейная обратная задача гравиметрии в общей постановке относится к классу некорректно поставленных неустойчивых задач. Использование скоростных разрезов позволяет построить плотностные модели начального приближения. Поиск небольших отклонений от модели начального приближения в пределах заданного каркаса границ позволяет существенно увеличить устойчивость решения обратной задачи.

Исходные данные при решении обратной задачи гравиметрии: 1) гравитационные измерения Δg с некоторым шагом на профиле; 2) геометрия разреза, представленного слоисто-блоковой моделью (границы); 3) начальные значения плотностей слоев и блоков; 4) ограничения, накладываемые на значения плотности. Необходимо определить набор плотностей слоев и блоков в рамках накладываемых ограничений, который обеспечивает близость измеренного и модельного полей.

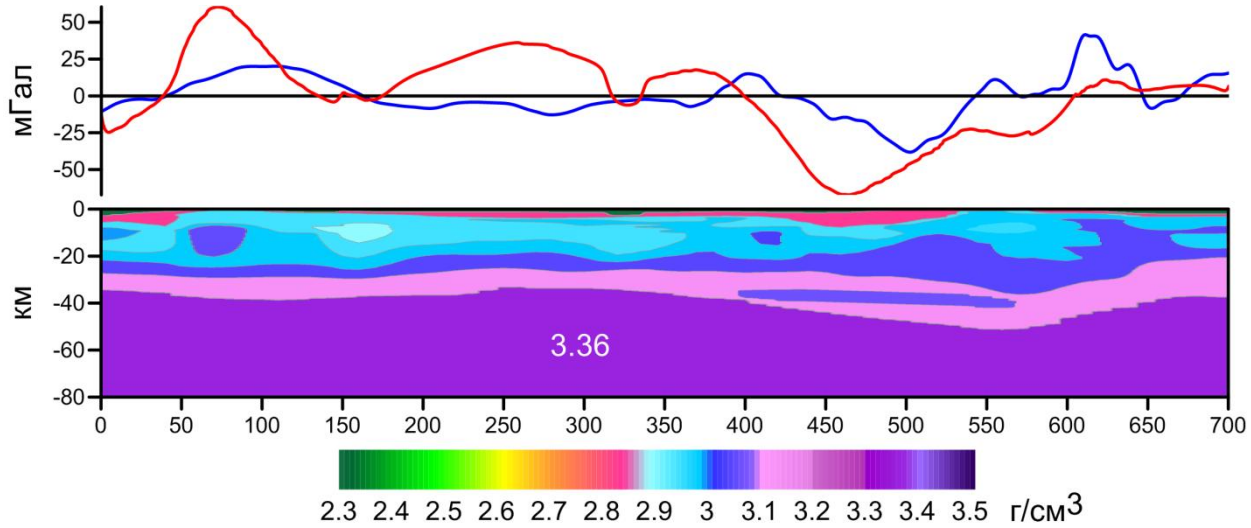


Рис. 1а. Плотностная модель начального приближения и графики гравитационных полей: наблюденного (синим) и модельного (красным) по профилю Кварц.

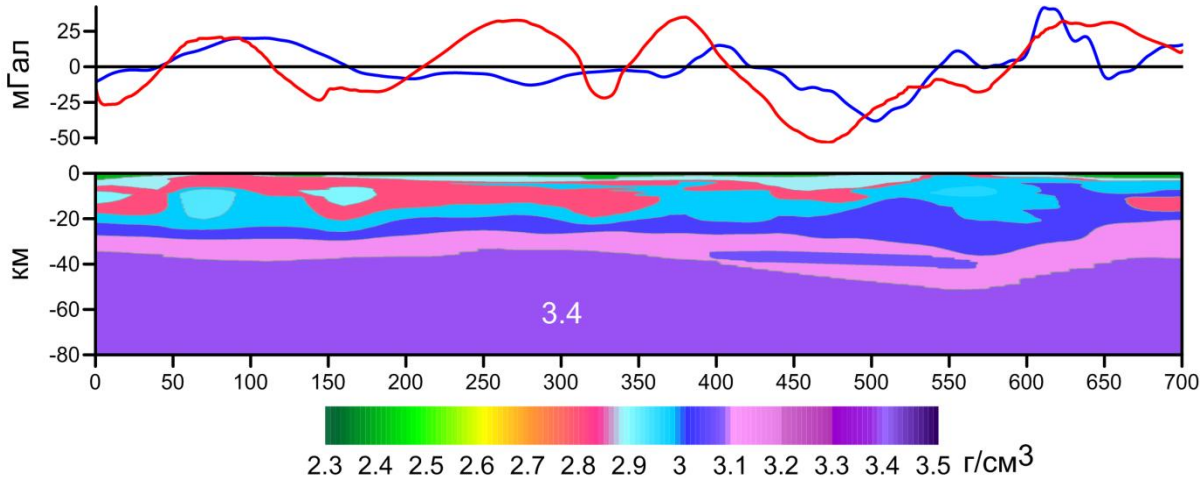


Рис. 1б. Модель с однородной мантией по профилю Кварц с подобранными плотностями в блоках выше М и средней плотностью верхней мантии. Графики гравитационных полей: наблюденного (синим) и модельного (красным).

Предлагаемый метод решения заключается в реализации следующих шагов:

1) параметризация слоисто-блоковой модели [3];

2) применение алгоритма послойного подбора плотностей [4].

По ходу реализации метода можно дополнительно определить:

1) гравиактивный слой, который формирует основные особенности гравитационного поля местности;

2) слои, поля которых могут существенно увеличивать норму разности измеренного и модельного полей.

На рис.1 приведены начальная (а) и подобранная (б) модели с однородной мантией.

3. Условие изостатической компенсации на глубине и выделение блоков в верхней мантии

Для уточненной модели с однородной мантией на каждой глубине h рассчитывается отклонение $\Delta P(x,h)$ литостатического давления $P(x,h)$ от его среднего значения $\bar{P}(h)$ на этом уровне по формулам:

$$\Delta P(x,h) = P(x,h) - \bar{P}(h) = g_a \int_h^0 \Delta\sigma(x,y)dy,\ P(x,h) = g_a \int_h^0 \sigma(x,y)dy$$

$$\bar{P}(h) = \frac{1}{L}\int_0^L P(x,h)dx = \frac{g_a}{L}\int_h^0\int_0^L \sigma(x,y)dx\,dy = g_a \int_h^0 \bar{\sigma}(y)dy$$

$$\bar{\sigma}(y) = \frac{1}{L}\int_0^L \sigma(x,y)dx,\ \Delta\sigma(x,y) = \sigma(x,y) - \bar{\sigma}(y)$$

где $g_a = 9{,}80665$ м/с^2 – среднее значение ускорения свободного падения, $\sigma(x,y)$ – значение плотности в соответствующей точке профиля, L – длина профиля, $\bar{\sigma}(y)$ – среднее значение плотности модели на соответствующей глубине, $\Delta\sigma(x,y)$ – отклонение плотности от ее среднего значения на глубине.

В качестве дополнительного граничного условия для построения блоков в верхней мантии принимается условие изостатической уравновешенности на глубине h_i = -80 км:

$$\Delta P(x,h_i) = 0 \qquad (1)$$

Для построения такой модели с изменением только верхов мантии вводится функция-компенсатор $\rho(x)$, которая показывает, какое значение плотности нужно вычесть из мантии (т.е. из слоя между границей М и уровнем h_i), чтобы на глубине h_i выполнялось условие (1). Пусть ΔP_{hom} и $\Delta\sigma_{hom}$ – отклонения литостатического давления и плотности от их средних значений на глубине для модели с однородной мантией, тогда при изменении плотности в мантии на $\rho(x)$ аномальное литостатическое давление на глубине h_i в новой модели будет равно

$$\Delta P(x,h_i) = \Delta P_{hom}(x,h_i) - g_a(h_m(x) - h_i)\rho(x)$$

где $y = h_m(x)$ – уравнение границы М. Из условия (1):

$$\rho(x) = \frac{\Delta P_{hom}(x,h_i)}{g_a(h_m(x) - h_i)} = \frac{1}{(h_m(x) - h_i)}\int_{h_i}^0 \Delta\sigma_{hom}(x,y)dy$$

При помощи вычисленной таким образом $\rho(x)$ из модели с однородной мантией построена идеально скомпенсированная на глубине 80 км плотностная модель с неоднородной мантией (рис. 2).

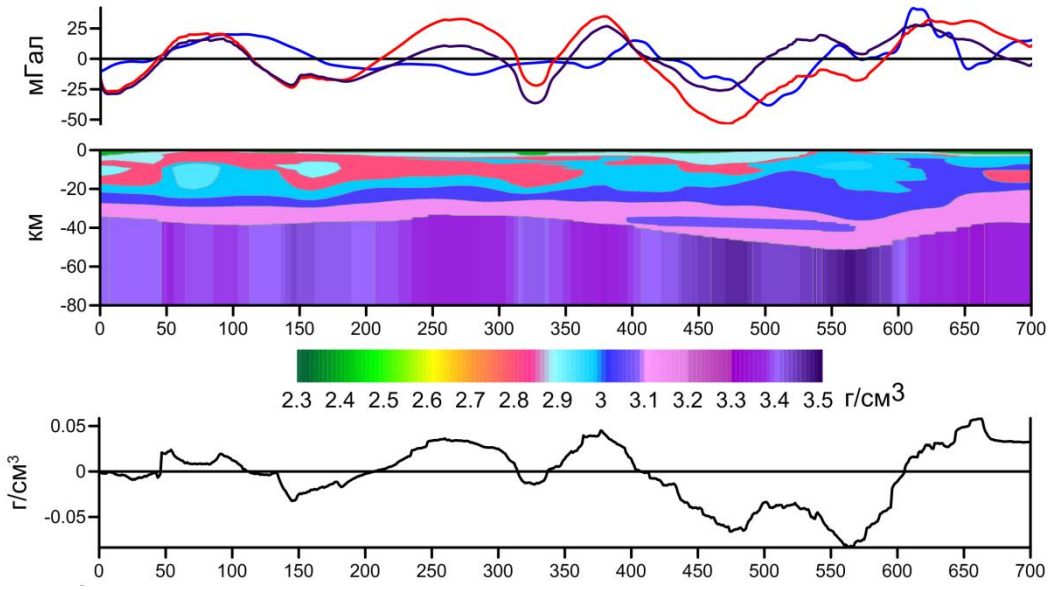


Рис. 2. Идеально скомпенсированная на глубине 80 км плотностная модель. гравитационные поля: наблюденное (синим), модели с однородной мантией (красным), идеально скомпенсированной модели (темно-фиолетовым). Ниже – график функции-компенсатора $\rho(x)$.

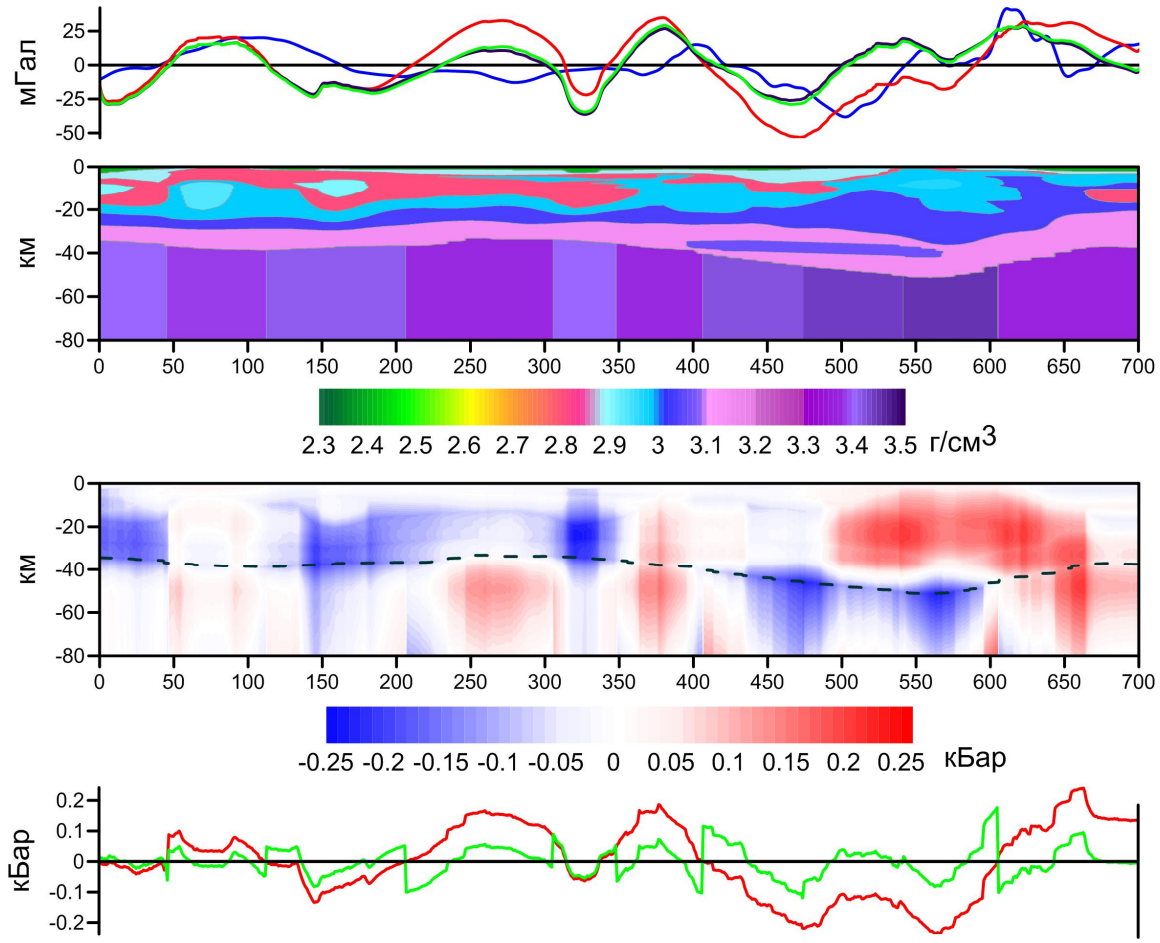


Рис. 3. Результирующая слоисто-блоковая плотностная модель по профилю Кварц. Выше приведены графики гравитационных полей: наблюденного (синим), модели с однородной мантией (красным), идеально скомпенсированной модели (темно-фиолетовым), результирующей (зеленым). Ниже – распределение аномального литостатического давления ΔP в результирующей модели (пунктиром нанесена граница М). Внизу – его график для глубины 80 км.

Далее, ниже границы М модель разбивается на несколько блоков вертикальными границами, внутри которых было проведено усреднение плотности. Х-координаты разбиения выбираются по нулям и экстремумам функции $\rho(x)$. Результирующая слоисто-блоковая плотностная модель по профилю Кварц показана на рис. 3.

Заключение

В работе представлена методика двумерного гравитационного моделирования, позволяющая унаследовать основные структурные особенности сейсмической модели разреза; учитывать различную априорную информацию (структурные границы, начальное распределение плотности, ограничения на него накладываемые); добиться хорошего соответствия наблюденного и модельного гравитационных полей; выполнять устойчивый подбор плотностей для большого числа блоков; изменять блочную структуру модели ниже определенной границы исходя из условия изостатического равновесия на заданной глубине и в достаточной степени уменьшить аномалии литостатического давления на ней. Все разработанные алгоритмы реализованы в прикладных программах для современных вычислительных систем. Для профилей на территории Тимано-Печорской плиты Агат-2, Кварц, Глобус, Сыктывкарский, Рубин-1, Красноленинский созданы двумерные модели распределения плотности, в которых выбором конфигурации блоков верхней мантии удалось с хорошей точностью выполнить условие изостатического равновесия на глубине 80 км. Работа выполнена в рамках проекта РФФИ **№ 14-05-31083**.

Литература

1. *Бызов Д.Д., Цидаев А.Г.* Методика построения плотностной модели верхней мантии с учетом условия изостатической компенсации на глубине // Уральский геофизический вестник. № 1. (25). 2015. С. 33-36.
2. *Мартышко П.С., Ладовский И.В., Колмогорова В.В., Цидаев А.Г., Бызов Д.Д.* Применение сеточных функций в задачах трехмерного плотностного моделирования // Уральский геофизический вестник. № 1. (19). 2012. С. 30–34.
3. *Мартышко П.С., Ладовский И.В., Цидаев А.Г.* Построение региональных геофизических моделей на основе комплексной интерпретации гравитационных и сейсмических данных // Физика Земли. 2010. № 11. С. 23–35.
4. *Кошелева Н.В*. О решении линейной обратной задачи гравиметрии для 2d слоистой модели с интерактивным учетом априорной информации // Уральский геофизический вестник. № 2. (24). 2014. С. 50–59.

УДК 550.838

О ПРИМЕНЕНИИ ГРАВИРАЗВЕДКИ НА ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ

А.П. Варзаков, В.Б. Виноградов, *Redrick777@gmail.com*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Работа посвящена исследованию возможностей применения гравиразведки на золоторудных месторождениях Амурской области. Рассматривается методика обработки гравиметрических данных, методика гравиметровой съёмки на поверхности.

APPLICATION OF GRAVITY SURVEY FOR GOLD DEPOSITS IN THE AMUR REGION

A.P. Varzakov, V.B. Vinogradov, *Redrick777@gmail.com*

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Article devoted to researching opportunities of gravity prospecting on gold deposits in the Amur region. Demonstrates processing gravimetrical data technique, methodic of gravimetric survey on surface.

В 70-х гг. XX века гравиразведочные работы проводились в основном на стадии регионального изучения, для обнаружения и выделения контуров распространения кислых интрузий [1,2]. Не смотря на то, что с тех пор произошло значительное повышение точности измерений, намного повысилась производительность труда и снизилась стоимость гравиразведочных работ, в настоящее время в геофизических организациях, специализирующихся на поисках золота, гравиразведка не находит должного применения.

В Амурской области распространены месторождения золото-сульфидно-кварцевой формации малых глубин гидротермально-генетического типа и метаморфогенно-гидротермального типа с золото-сульфидно-кварцевой формацией больших глубин. Золотооруденение в них приурочено к зонам сульфидизации. Плотность сульфидизированных пород зависит от интенсивности сульфидизации по линейному закону:

$$\sigma_{\text{оруд}} = \sigma_{\text{гп}}(1 - v) + v\sigma_{\text{сульф.}}$$

где $\sigma_{\text{оруд}}$ – плотность сульфидизированных горных пород, $\sigma_{\text{гп}}$ – плотность несульфидизированных горных пород, $\sigma_{\text{сульф}}$ – плотность сульфидов, v – объёмное содержание сульфидов. Следовательно интенсивность аномалий силы тяжести пропорциональна интенсивности сульфидизации.

На рисунке 1 приведен результат гравиметровой съёмки на золоторудном месторождении. Геологические построения противоречат результатам измерений, по полю силы тяжести можно судить о противоположном направлении падения пород.

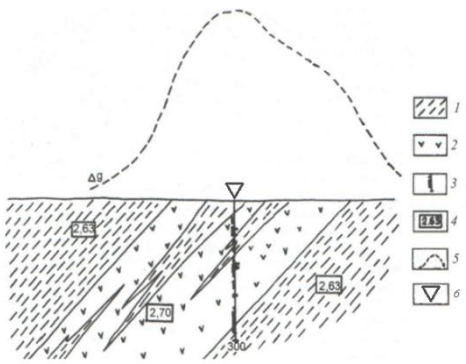
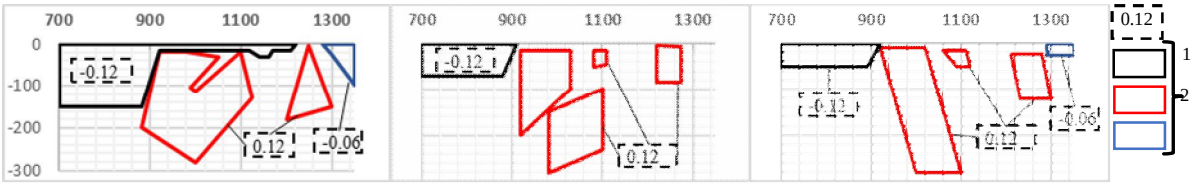


Рисунок 1. Геолого-геофизический разрез золоторудного месторождения: 1 – углистый филлит; 2 – метавулканиты; 3 – интервал пород с сульфидной минерализацией 3 %; 4 – плотность пород в г/см^3; 5 – график поля силы тяжести Δg; 6 – скважина.

Геологический разрез, приведённый на рисунке 1, построен по данным одной скважины. Были созданы модели с западным, вертикальным и восточным падением сульфидизированной

зоны в толще метавулканитов среди углистых филлитов (Рисунок 2 а,б,в). При расчётах интенсивность сульфидизации по данным бурения принималась равным 3 % и 1 % для убого сульфидизированной зоны. Подбор поля осуществлялся с утроенной погрешностью съёмки.



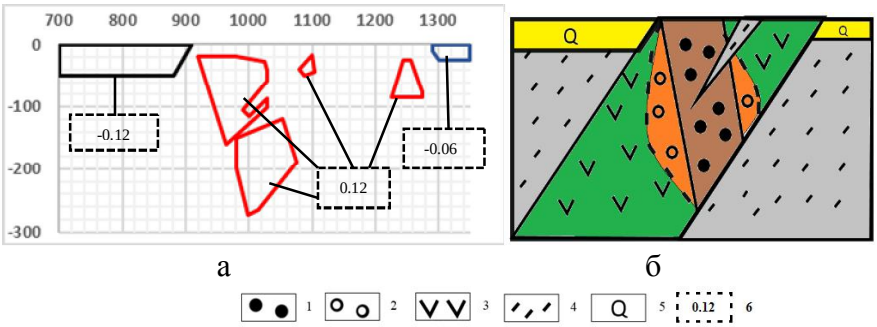
а б в

Рисунок 2. Плотностные модели с различным направлением падения сульфидизированных зон западное падение (а), вертикальное падение (б), восточное падение (в) сульфидизированной зоны: 1 – избыточная плотность объекта г/см^3; 2 – контуры аномалиеобразующих объектов.

Для уточнения геологического строения при обработке поля силы тяжести применен гарантированный подход создания плотностной модели. Применение этого метода позволяет найти вариант интерпретации, который обеспечивает максимум гарантированной меры близости построенной модели источника аномалии к реальному объекту [3].

На плотностной модели выделена область пересечения моделей и определена гарантированная область присутствия источников. Эта гарантированная область была применена в качестве начальной модели для подбора окончательной плотностной модели гравитационного поля. Результаты подбора приведены на рисунке 3а.

Количественный расчёт приводит к выводу о наличии достаточно большого ореола сульфидов с содержанием 1% и пластообразной зоны с содержанием сульфидов 3%, круто падающей на восток. Результатом работы является новый подобранный геологический разрез (рис. 3б)



а б

Рисунок 3. – Области гарантированного размещения источников (а), подобранный геологический разрез (б): 1 – зона с содержанием сульфидов 3 %; 2 – область с содержанием сульфидов 1 %; 3 – углистый филлит; 4 – метавулканиты; 5 – рыхлые отложения; 6 – избыточная плотность объекта г/см^3

Успешное применение гравиразведки в предыдущем примере даёт основание для применения гравиразведки на других месторождениях, где золотооруденение так же приурочено к зонам сульфидизации. Рассмотрим одно из золото-порфировых месторождений, располагающееся в Амурской области. Для построения двухмерной плотностной модели был использован геологический разрез по одному из профилей с данного участка. По этой модели было рассчитано поле силы тяжести (рис. 4). При условии наличия нескольких зон сульфидизации амплитуда аномалии составила 6,3 мГал. А при условии отсутствия зон амплитуда аномалии поля силы тяжести составила 5,8 мГал.

Выделение поля, создаваемого зонами сульфидизации, из общего поля проведено методом осреднения.

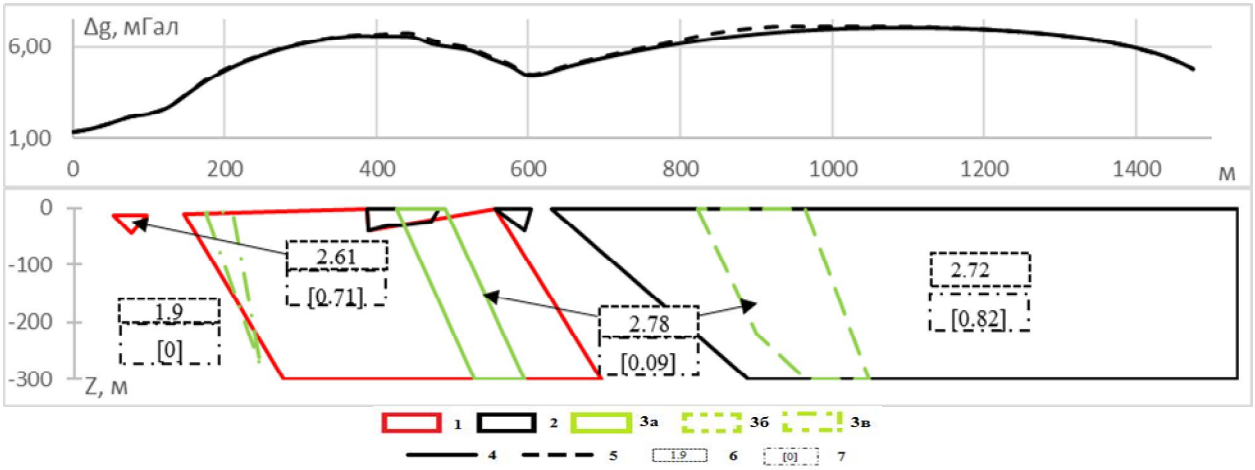


Рисунок 4. – плотностная модель: 1 – Брекчии и брекчированные породы; 2 – гранодиорит-порфиры; 3а – зона с сульфидизацией 5 % №1; 3б – зона с сульфидизацией 5 % №2; 3в – зона с сульфидизацией 5 % №3; 4 – $\Delta g_{расч}$ при отсутствии зон сульфидизации; 5 – $\Delta g_{расч}$ при наличии зон сульфидизации; 6 – плотность пород в г/см^3; 7 – избыточная плотность пород в г/см^3

Осреднение выполнялось с радиусами – 75, 125 и 175 метров. Наиболее оптимальным оказалось использование интервала величиной в 125 м, т.к. в этом случае в поле остаточных аномалий лучше всего отражается влияние зон сульфидизации. Форма графиков остаточных аномалий близка к таковой рассчитанных полей зон сульфидизации.

Было исследовано влияние погрешности измерений на результаты расчётов. К значениям $\Delta g_{расч}$ была добавлена случайная помеха, подчиняющаяся нормальному закону с нулевым средним и стандартом $\varepsilon = \pm 0.1$ мГал. Помеха была рассчитана в среде Mathcad 15.0.

Разность между $g_{оср}$ и $\Delta g_{расч}$ показывает, что выделение зон сульфидизации мощностями от 30 до 180 м с шагом 25 м может стать затруднительным. В связи с этим был проведён расчёт поля силы тяжести с шагом 10 м, с учётом погрешности $\varepsilon = \pm 0.1$ мГал. Было выполнено экспоненциальное сглаживание.

После осреднения с радиусом R=120 м был построен график разности между $g_{оср}$ и $\Delta g_{(сгл)}$. Анализ этого графика показал, что уверенно выделяются зоны сульфидизации мощностью в 180 м и 60 м. Следовательно, при съёмке в масштабе 1:10 000 возможно выделение зон сульфидизации с мощностями более 60 м.

Автором не известны примеры применения гравитационного каротажа на месторождениях золота. Для его оценки была построена двухмерная плотностная модель на основе геологического разреза с золоторудного поля, расположенного в Амурской области. Мощность зоны сульфидизации в данном случае составляет 8 м, глубина залегания центра масс – 90 м. По этой модели было рассчитано поле силы тяжести на поверхности, а также в скважинах. Избыточная плотность σ=0.09 г/см^3. Амплитуда аномалии на поверхности составила 0.048 мГал. Амплитуда в скважине составила 0.118 мГал. Современные скважинные гравиметры позволяют выделить аномалии такой интенсивности.

Выводы: Учитывая высокую точность современных измерений, следует ожидать, что по данным гравиразведки будут фиксироваться зоны сульфидизации мощностью в первые десятки метров. При истолковании гравитационных полей золоторудных месторождений эффективен гарантированный подход. Гравиметрические работы на золоторудных месторождениях Амурской области рекомендуется выполнять по интерпретационным профилям с шагом не более 25 м. Гравитационный каротаж перспективен для нахождения зон сульфидизированных пород, определения их местоположения, мощности, углов падения, размеров по падению и простиранию. Это справедливо и для месторождений других полезных ископаемых.

Список литературы

1. Воларович Г.П. Геофизика золоторудных месторождений. – Москва: ЦНИГРИ, 1977. – 285 с.
2. Экзогенная золотоносность. Методическое руководство по оценке прогнозных ресурсов алмазов, благородных и цветных металлов. / сост. Е.В. Матвеева, О.С. Набровенков, Н.М. Риндзюнская, А.А. Сапрыкин, В.П. Филиппов; отв. ред. С.С. Вартанян, Н.М. Риндзюнская. – 2-е изд. – М.: ЦНИГРИ, 2010. – 130 с.
3. Балк П.И., Долгаль А.С. Минимаксный подход к решению обратных задач гравиразведки и магниторазведки // Доклады академии наук. 2015. Т.462, №6. с. 706–710.

Акимова Е.Н., Мисилов В.Е., Косивец Р.А. Оптимизированный алгоритм решения задачи гравиметрии о нахождении плотности в горизонтальном слое	4
Антонов В.А. Метод комплексной геопространственной оценки качества титаномагнетитов	9
Баталева Е.А. Корреляционный анализ мониторинговых данных	14
Бахтерев В.В. Опыт применения энергии микроволн при анализе вещества (на примере определения оксида хрома в руде)	19
Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Реконструкция структурных характеристик горных пород по данным наблюдений акустической эмиссии	22
Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Рашидов В.А., Трусов А.А., Комплексные геолого-геофизические исследования подводного вулкана Обручева (Курильская островная дуга)	26
Бобровников Н.В., Петухова Ю.Б. О точности определения солёности вод при геоэкологических исследованиях	30
Бобровников Н.В., Юрков А.К. Об экспериментах по использованию электромагнитных полей блуждающих токов для геоструктурных исследований	34
Бобровский В.С., Шопин С.А. Сеть подземно-электрических измерений и некоторые полученные результаты	38
Болдина С.В., Копылова Г.Н. Оценка косейсмической деформации при землетрясении 28 февраля 2013 г., Mw = 6.8 по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка	43
Боровский М.Я., Богатов В.И., Шакуро С.В., Фахрутдинов Е.Г. Методы сопротивлений и естественных электрических потенциалов – эффективный эколого-геофизический комплекс в районах нефтедобычи	48
Буртный П.А., Корчин В.А. Геологическое моделирование земной коры центральной части Украинского щита по материалам РТ-петрофизики, ГСЗ и гравиметрии	51
Быцань Е.Н. О надежности промышленно-хозяйственных сооружений в районах с повышенным сейсмическим риском	54
Бычков С.Г. Геологическая интерпретация результатов томографической трансформации геопотенциальных полей	57
Вишнев В.С., Дьяконова А.Г., Сурина О.В. Некоторые разработки по применению поля токов электрической железной дороги для решения геологических задач	62
Власова А.В., Лобова Г.А., Ахметов Е.М., Исаев В.И. Геотермия как метод разведочной геофизики (на примере оценки поисковых перспектив резервуаров ув осадочного чехла и фундамента)	67
Володькова Т.В. Связь региональных аномалий отношений естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) с глубинным строением	72
Горнов П.Ю. Тепловое поле литосферных плит северо–востока Евразии	77
Горностаева А.А., Антипин А.Н. Корректировка временной шкалы геотермических реконструкций палеоклимата на основе орбитальных инсоляционных кривых	82
Горшков В.Ю., Байдиков С.В., Давыдов В.А. Применение методов малоглубинной электроразведки при изучении плотины Ельчевского пруда-отстойника	87
Гребенникова В.В. Модели сводных изосейст исторических и современных землетрясений с интенсивностью сейсмических сотрясений от I_6 до I_{10-11} баллов	90
Гуляев А.Н. Детальное сейсмическое районирование центральной части Уральского региона	95
Гуляев А.Н. Сейсмичность центральной части Уральского региона	101
Демежко Д.Ю., Горностаева А.А., Майорович Я., Шафанда Я. Новая палеоклиматическая интерпретация данных термометрии скважины Hunt Well (Канада)	107
Дода Л.Н., Малашин А.А., Натяганов В.Л., Степанов И.В., Шопин С.А. Аномальные облачные кольцевые структуры в небе над Японией	111

Дода Л.Н., Натяганов В.Л., Бобровский В.С., Шопин С.А. Геофизические признаки сильнейшего глубокофокусного Охотоморского землетрясения 24 мая 2013г 116
Долгаль А.С., Мичурин А.В., Новикова П.Н. Использование метода конечных элементов при решении обратных задач гравиразведки и магниторазведки 121
Долгаль А.С., Хохлова В.В. Алгоритм вычисления гравитационного эффекта сферического параллелепипеда 126
Дружинин В.С., Осипов В.Ю., Начапкин Н.И. К вопросу о необходимости учета информации о строении земной коры при региональном геокартировании и для прогноза месторождений углеводородов в Уральском регионе 130
Дубовенко Ю.И. Об одном способе уточнения фигуры Земли по значениям потенциала притяжения в ограниченной области 135
Дучков А.Д., Пермяков М.Е., Соколова Л.С., Манаков А.Ю. Лабораторные установки для изучения физических свойств гидратосодержащих пород 141
Ермаков А.В. Пространственная изменчивость теплопроводности неконсолидированных донных осадков вблизи архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа 146
Ерофеев В.А., Протопопов А.А., Дода Л.Н., Шопин С.А. К вопросу о возможном физическом механизме взаимосвязи геомагнитных возмущений и сильных землетрясений 151
Ефименко О.С., Ефименко С.А., Портнов В.С., Маусымбаева А.Д. Ядерно–геофизические технологии «on−line» контроля качества руды, поступающей на Жезказганскую обогатительную фабрику № 1 156
Жанибеков Б.О., Турапов М.К., Умматов Н.Ф. Тектонофизические и геодинамические условия размещения золотого оруденения в Гузаксайском грабене (Чадакское рудное поле, Чаткало-Кураминский регион) 161
Знаменский С.Е. Общекоровые транспрессивные сдвиги палеоокеанического сектора Южного Урала 164
Иголкина Г.В., Дрягин В.В., Хачай О.А., Иванов Д.Б., Мезенина З.С. К вопросу о экологически безопасной технологии повышения нефтеотдачи 167
Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С., Гриб Н.Н. Тектонодинамическая модель зоны взаимодействия северо-восточного фланга Байкальского Рифта и Алдано-Станового блока 172
Искоркина А.А., Исагалиева А.К., Исаев В.И. Моделирование геотермического режима нефтематеринских отложений с учетом неоплейстоценового оледенения 176
Кишман-Лаванова Т.Н. Решение обратной задачи гравиметрии в рамках статистического и детерминистского подходов 181
Козлова И.А., Меньшикова А.М., Предтеченская Е.И., Юрков А.К. Изучение сорбционной способности проб гранитного отсева различных фракций по отношению к радону 186
Копылов И.С. Оценка современной геодинамики и неотектоники аэрокосмогеологическими методами на месторождениях калийных солей 189
Корчин В.А. Термобарическое локальное повышение пористости горных пород в земной коре по данным петрофизического моделирования 194
Кочнев В.А. Обратное вращение Венеры и ее холодное ядро – реальность или ошибка интерпретации геофизических данных? 199
Кочнев В.А. Анализ изменений Z-компоненты геомагнитного поля IGRF в геоцентрической системе координат 203
Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. О возможности использования значений пластового давления флюидов в коллекторах для оценки перспектив нефтегазоносности глубинных горизонтов разреза 208
Локтев Д.Н., Спивак А.А. Особенности вариаций геофизических полей в условиях мегаполиса 213

Ломтев В.Л. Новое в строении и истории абиссальных холмов СЗ плиты Пацифики 218
Ломтев В.Л. Новые данные по тектонике СЗ плиты Пацифики 223
Магомедов М.Н. О барической фрагментации железа и природе геотермального тепла 228
Макарова Н.В., Макеев В.М., Дорожко А.Л., Суханова Т.В., Коробова И.В. Геодинамические системы и геодинамически активные зоны в новейшей структуре Восточно-Европейской платформы 233
Мартышко П.С., Ладовский И.В., Бызов Д.Д. Методика и алгоритмы построения трёхмерных плотностных моделей на основе интерпретации гравитационных и сейсмических данных 238
Мартышко П.С., Пьянков В.А., Рублев А.Л., Гемайдинов Д.В. Изучение природы источника радоновых аномалий (Калифорния) 242
Миндубаев М.Г. Свободная тепловая конвекция в высокопроницаемых слоях пористой среды с различной пространственной ориентацией 246
Муравина О.М., Глазнев В.Н. Метод локальных поправок при плотностном моделировании строения литосферы 249
Мухамедяров Р.Д. Куда уходит вода озера Чад? 253
Мухамедяров Р.Д. Применение технологии МВТГМ для описания геоструктуры 3D - 4D г. Казани 258
Паровышный В.А., Сеначин В.Н., Сохатюк Ю.В. Казаков А.И., Веселов О.В., Кочергин Е.В. Особенности вариаций естественных геофизических полей над залежью углеводородов 263
Пятаков Ю.В. Использование методов теории потенциала при решении прямой трехмерной стационарной задачи геотермии в условиях зависимости теплопроводности пород от температуры 268
Романов А.М. Взаимосвязи термодинамических и электрических параметров процесса взаимодействия горных пород и вод 273
Рябова С.А., Спивак А.А. Вариации сейсмического фона в периоды геомагнитных вариаций 282
Рябова С.А., Спивак А.А., Горбунова Э.М. Вариации магнитного типпера на земной поверхности при изменении уровня подземных вод 288
Самаров В.Н., Непомнящий В.З., Комлева Е.В. Концепция Кольского международного кластера технологий обращения с высокоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом 293
Самаров В.Н., Непомнящий В.З., Комлева Е.В. Эволюция концепций подземного хранения/захоронения ОЯТ/РАО 296
Сарвартинов А.И., Арзамасцев Е.В. Поиск электромагнитных неоднородностей по фазовому параметру 301
Стогний Г.А., Стогний В.В. Сейсмогенерирующие разломы кристаллического фундамента Верхояно-Колымской орогенной области 305
Сурина О.В., Дьяконова А.Г., Вишнев В.С. Электрогравитационная модель верхней части литосферы Северного Урала 309
Тимофеев Д.Н Силановая нефть и глобальные процессы трансформации Земли 316
Тимохин А.В., Лаптев Ю.В., Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М. Горно-геометрические задачи картирования карстов и роль гидродинамической модели в прикладных схемах полевой электроразведки и скважинных методов: резистивиметрии и термометрии 321
Тимохин А.В., Лаптев Ю.В., Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М. Петрофизическая характеристика и геохимическая регистрация (металлометрический принцип) рудных полей, представленных различными гео-типами Mg, Al, Fe-минерализации, при разномасштабной сырьевой оценке 326
Тимохин А.В., Лаптев Ю.В., Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М. «Влагомерная» методика электрометрии как принципиальное решение формирования 331

устойчивой, безопасной геометрии добычных блоков на разрабатываемых карьерами месторождениях титаномагнетитов и хризотиласбеста
Хасанов И.М., Муравьев Л.А., Терновский В.А., Ткачев А.В. Геофизические работы при поисках рудных месторождений золота Магаданской области на примере Тохтинской перспективной площади 335
Хачай О.А., Хачай А.Ю. Моделирование и интерпретация волновых полей в иерархически неоднородных средах 340
Хачай О.А., Хачай О.Ю., Климко В.К., Шипеев О.В. Информативные признаки подготовки высокоэнергетических динамических явлений по данным шахтного сейсмологического мониторинга 345
Хачай Ю.В., Анфилогов В.Н., Антипин А.Н. Механизмы конвекции в растущем ядре земли и их проявление в остаточной намагниченности земных метеоритов 350
Христенко Л.А., Степанов Ю.И. Быстрое вейвлет-преобразование с базисными функциями Хаара при интерпретации данных электропрофилирования 354
Чалова В.С., Литовченко И.Н. Применение алгоритма распознавания роевых последовательностей землетрясений в сейсмоактивном регионе Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий 358
Чубаров Д.Л, Кочнев В.А. Расчет и анализ приливных сил Луны и Солнца, действующих на тело заданной массы с учетом вращения Земли 363
Шаров Н.В. Скоростные неоднородности литосферы Фенноскандинавского (балтийского) щита 368
Шитов А.В., Кудрявцев Н.Г., Кудин Д.В., Учайкин Е.О. Изучение влияния сейсмических событий на метеорологические характеристики и объемную активность радона (на примере Горного Алтая) 373
Шопин С.А. Резонансные эффекты в экспериментах с горизонтальными крутильными маятниками 378
Юрков А.К., Козлова И.А., Антипин А.Н. К вопросу применения радоновых исследований при изучении неглубоко залегающих карстовых полостей 383
Баженова Е.А., Белоглазова Н.А., Вдовин А.Г., Глухих И.И., Иванченко В.С., Калугина С.В. Выделение типов титаномагнетитовых руд и оценка их технологических свойств (влияние примесей в магнетитах на типы руд и их обогатимость) 386
Баженова Е.А. Возможности челночных измерений геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения по результатам скважинных исследований 389
Вдовин А.Г. Электромагнитное излучение как индикатор масивного магнетитового оруденения 393
Бызов Д.Д., Цидаев А.Г., Кошелева Н.В. Построение 2D плотностной модели верхней мантии с учетом условия изостатической компенсации на глубине на примере профиля Кварц 397
Варзаков А.П., Виноградов В.Б. О применении гравиразведки на золоторудных месторождениях Амурской области 402

Научное издание

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ, ГЕОДИНАМИКА, ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ, ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Восьмые научные чтения Ю.П. Булашевича

Материалы конференции

Рекомендовано к изданию Ученым советом Института геофизики УрО РАН

Редактор Мартышко П.С.
Компьютерная верстка Рублева А.Л.

Подписано в печать 01.09.2015 г.
Формат 60x84 1/8
Усл. печ. л. 16.5, Уч.-изд. л. 16.5
Тираж 150 экз. Заказ № 371

620016 Екатеринбург, ул. Амундсена, 100
Институт геофизики УрО РАН

Размножено с готового оригинал-макета в типографии
ООО «ИРА УТК», 620000, г. Екатеринбург, ул. Шаумяна, 83