

Спичак В.В., Безрук И.А., Гойдина А.Г. (Центр геоэлектроманнитных исследований ИФЗ РАН)

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ КЛАСТЕРНЫХ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПО СОВОКУПНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ИЗМЕРЕННЫХ НА ОПОРНЫХ ПРОФИЛЯХ

*По геофизическим данным, измеренным вдоль опорных профилей на Тээлинском участке Алтае-Саянской складчатой области, построены трехмерные модели удельного сопротивления и сейсмических скоростей. Показано, что с помощью нейросетевых методов классификации, основанных на самоорганизующихся картах Кохонена, можно создать трехмерную кластерную петрофизическую модель участка земных недр. Установлено, что общая геометрия аномальных зон в пространстве координат определяется поведением скоростей сейсмических волн (главным образом поперечных), а свойства пород и литология — другими геофизическими данными. Выявлено расположение областей трещиноватости, приуроченных к Шапшальской и Куртушибинской разломным зонам, а также зон частичного плавления. **Ключевые слова:** геофизические данные, комплексный анализ, кластерная петрофизическая модель, опорные профили, трехмерная среда.*

Spichak V.V., Bezruk I.A., Goydina A.G. (Goelectromagnetic Research Centre IPE RAS)

CONSTRUCTION OF THE THREE-DIMENSIONAL CLUSTER PETROPHYSICAL MODELS OF GEOLOGICAL MEDIUM BASED ON THE GEOPHYSICAL DATA COLLECTED ALONG REFERENCE PROFILES

*3D models of specific electrical resistivity and seismic velocities of the Teelin part of the Altai-Sayan folded area are built based on the geophysical data collected along the reference profiles. It is shown that application of the neural network classification based on the Kohonen self-organizing maps enables to construct a 3D cluster petrophysical model of the study area. It is found that the geometry of the anomalous zones in the coordinates' space is determined by seismic velocities (mainly, by Vs) while the rocks properties and lithology are determined from other geophysical data. The locations of the fracture zones attributed to the Shapshalskii and Kurtushibinskii faulted areas as well as partially melted zones are determined. **Key words:** geophysical data, joint analysis, cluster petrophysical model, reference profiles, three-dimensional medium.*

В России исторически сложился полуэмпирический подход к комплексной интерпретации геофизических данных, измеренных на геотраверсах, в котором совместный анализ отдельных геофизических моделей осуществляется на основании их визуального сравнения, а не с помощью регулярных математических алго-

ритмов. В результате этого процесса строится так называемая геолого-геофизическая модель, которая затем анализируется в содержательных терминах на основе опыта интерпретатора. Такой субъективный подход, безусловно, не может служить основой для последующей разработки практических рекомендаций по принятию решений в области рационального природопользования.

В какой-то мере этот недостаток компенсируется за счет применения фокусирующих алгоритмов, в которых первичной целью апостериорного количественного анализа является локализация областей резкого изменения свойств среды в однометодных моделях [4, 5, 12 и др.]. Преимуществом этого подхода является то, что границы областей однородности физических свойств определяются по картам изолиний их экстремумов, естественным образом ограничивающих зоны плавного изменения этих свойств. В тех случаях, когда эти границы для разных однометодных моделей совпадают, удается построить «геометризованную» модель и в дальнейшем оценить физические свойства соответствующих однородных блоков.

Недостатком этого подхода является то, что если найденные таким образом границы однородных областей для разных физических свойств не совпадают (а это, по-видимому, наиболее частый в практике случай), то надежность всех последующих построений ставится под вопрос. Отметим аналогичный недостаток так называемого структурного подхода, основанного на априорном постулировании общей структуры однометодных моделей: если эта гипотеза не соответствует действительности, то общая структура и соответственно ее наполнение могут иметь мало общего с реальностью (см. аналитический обзор методов комплексного анализа геофизических данных [7]).

Другой недостаток применяемых на практике подходов к комплексной интерпретации состоит в построении двумерных моделей, тогда как реальная среда всегда, как минимум, трехмерна. Это особенно касается сейсмо- и вулканоактивных регионов, в которых свойства пород могут изменяться в четырех измерениях.

В то же время сегодня существуют подходы к построению трехмерных комплексных моделей среды по геофизическим данным, измеренным вдоль опорных профилей, и имеющейся априорной информации. Так, в работе [8] была построена трехмерная геоэлектрическая модель в окрестности участка регионального профиля 1-СБ в Восточной Сибири на основе комбинированной инверсии профильных и архивных магнитотеллурических (МТ) данных, имевшихся в его окрестности, а в работе [9] — сделан прогноз нефтегазоносности этого участка. На основе применения нового подхода к восполнению геофизических параметров среды [10] были построены трехмерные модели сейсмических ха-

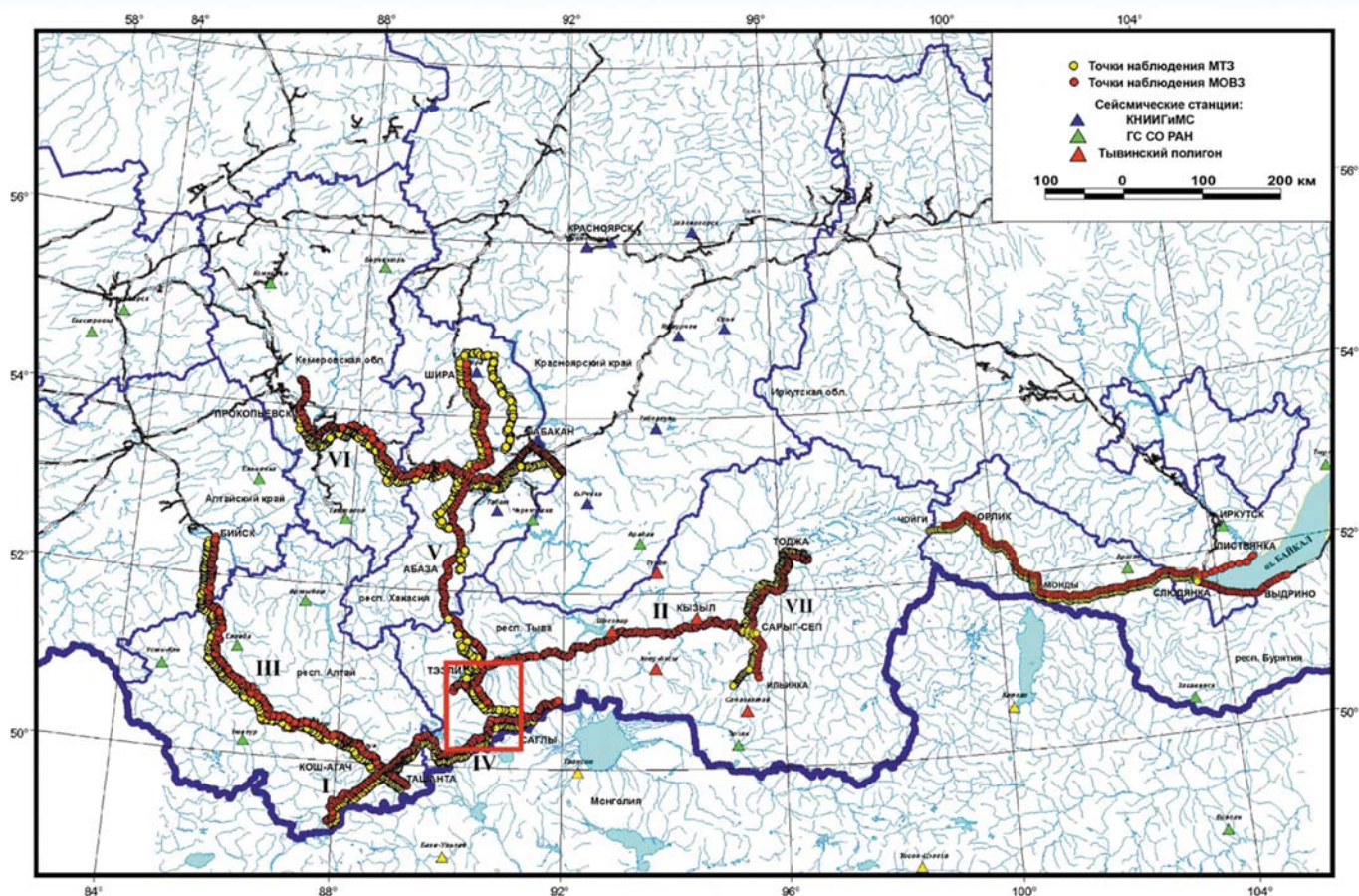


Рис. 1. Общая схема работ МОБЗ и МТЗ в Алтае-Саянском регионе. Профили: I — Кош-Агач — Тээли; II — Тээли — Кызыл — Сарып-Сег; III — Ташанта — Кош-Агач — Бийск; IV — Ташанта — Саглы; V — Саглы — Абаза — Шира; VI — Абакан — Прокопьевск; VII — Кызыл — Орлик — Слюдянка. Красным прямоугольником выделен Тээлинский участок работ

рактических по двумерным геоэлектрическим и сейсмическим разрезам [11].

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы продемонстрировать применение упомянутых выше новых методов и подходов на примере построения трехмерной кластерной модели Тээлинского участка недр Алтае-Саянской складчатой области (рис. 1) по совокупности магнитотеллурических и сейсмических данных, измеренных на опорных профилях II, IV и V [3].

Трехмерная геоэлектрическая модель. Для построения стартовой 3D-модели удельного сопротивления исследуемого участка была применена кригинг-интерполяция 1D-инверсии МТ данных. Решение обратной задачи МТЗ методом подбора выполнялось по программе FDM3D (описание алгоритма — см. [6]) с учетом результатов численного моделирования [1]. При расчетах использовалась сетка $150 \times 150 \times 70$ узлов с шагом 2 км в пределах центрального блока модели, что позволило построить трехмерную модель удельного сопротивления рассматриваемой области (горизонтальные срезы построенной модели представлены на рис. 2а).

Анализ построенной трехмерной модели показывает, что фоновое удельное сопротивление коры в рассматриваемом регионе превышает $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. На этом фоне выделяются более и менее проводящие участки с удельным сопротивлением порядка 10 и $>10\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

соответственно. При этом общая структура распределения удельного сопротивления носит мозаичный характер с чередованием низко- и высокоомных блоков, что соответствует априорным представлениям о разломно-блоковой структуре Алтае-Саянской складчатой области.

Высокоомные домены сложены породами раннекаледонского возраста с офиолитовыми ассоциациями, имеющими высокое сопротивление. В то же время, на геоэлектрическом разрезе видны и низкоомные зоны. Одна из них приурочена к северной ветви Хемчикско-Куртушибинского разлома. В юго-западной части Тээлинского участка, расположенной в пределах орогенных вулканогенно-моцассоидных каледонид, виден другой хорошо проводящий домен, примыкающий к сейсмоактивному Шапшальскому глубинному разлому северо-западного направления (на рис. 2а он виден на переднем плане).

3D-инверсия показала, что 1D-инверсия в большинстве случаев качественно выделяет аномальные блоки в разрезе, но параметры этих блоков отличаются от полученных при 3D-инверсии. Как уже отмечалось, удельное сопротивление коры региона носит мозаичный характер, отражающий взаимодействие широтных структурно-тектонических зон Тувы со структурами Алтая, имеющими северо-западное простирание.

Построение трехмерных моделей сейсмических характеристик. Для построения трехмерных моделей сейсмических скоростей по фрагментам двумерных разрезов применялась методика восполнения недостающих геофизических данных, предложенная в работе [10]. В качестве исходных были использованы разрезы удельного сопротивления и сейсмических скоростей вдоль фрагментов профилей IV (Ташанта — Саглы) и V (Саглы — Абаза — Шира), проходящих через рассматриваемый участок [3] (рис. 1).

В результате применения нейросетевой технологии были построены трехмерные модели скоростей продольных и поперечных сейсмических волн (рис. 2б, в). Их анализ позволил сделать следующие общие выводы.

1. Поведение скоростей продольных и поперечных волн в построенных моделях носит существенно трехмерный характер, поэтому их аппроксимации горизонтально-слоистыми моделями, которые до сих пор делались, следует считать далекими от действительности (по крайней мере в таком сложно построенном геологическом районе). В целом, и те и другие скорости медленно растут с глубиной, хотя наблюдаются и аномалии такого поведения.

2. Скорости продольных волн изменяются в диапазоне от 6,05 до 7,48 км/с (медианное значение — 6,76 км/с) (рис. 2б), а скорости поперечных волн — в диапазоне от 3,53 до 4,26 км/с (медианное значение — 3,89 км/с) (рис. 2в). Среднее значение отношения V_p/V_s составляет 1,74, что соответствует оценкам, полученным в работе [2] для консолидированной коры складчатых регионов.

3. Скорости продольных волн понижены в западной части региона. В частности, это касается обширной области на глубинах 10–30 км в северо-западной части участка, а также на глубинах 40–50 км — в его юго-западной части, где можно говорить о существовании волновода на глубинах непосредственно над границей Мохо.

4. Скорости поперечных волн аномально повышены в северо-восточной и юго-западной частях верхней коры, примыкающих к Шапшальскому разлому. С другой стороны, они аномально понижены в обширной центральной диагональной полосе северо-западного

простирая (до глубины примерно 30 км) (рис. 2в). В ее юго-восточной части, совпадающей с северной частью Шапшальского очага, зона повышенного поглощения поперечных сейсмических волн ориентирована вдоль воздымающихся структур Монгольского Алтая. В северо-западной части участка, покрывающей южную часть Тээлинского очага, эта зона ориентирована вдоль приподнятых блочных структур Западного Саяна.

Такое контрастное поведение скоростей сейсмических волн в недрах рассматриваемого участка свидетельствует о чередовании зон сжатия и разгрузки напряжений. В то же время, для более корректной комплексной интерпретации построенных моделей необходима дополнительная информация о плотностных характеристиках среды.

Нейросетевой кластерный анализ. Один из подходов к апостериорному анализу моделей физико-механических свойств пород, не связанный с априорным постулированием общих геометрических границ однородных блоков, состоит в применении к этим моделям регулярных методов классификации с целью выделения областей с максимальной корреляцией рассматриваемых свойств и последующего прогноза по ним параметров моделей более высокого уровня, в частности, флюидонасыщенности, сейсмичности и др. [7]. Этот подход базируется на основополагающем предположении всей геофизики, состоящем в том, что геологические объекты характеризуются своими физическими свойствами и могут быть различимы по индивидуальным измерениям этих свойств. Иначе говоря, структуры могут быть различимы при условии, что их разделение в пространстве параметров больше, чем вариации физических параметров внутри структур.

Одним из методов классификации является кластерный анализ — метод группирования по принципу близости примеров в пространстве свойств. При этом построение групп основано только на свойствах и не принимает во внимание информацию о принадлежности примеров к конкретной литологической группе. Это отличает данный метод от других, в которых для построения статистической модели для классификации используется обучающая выборка.

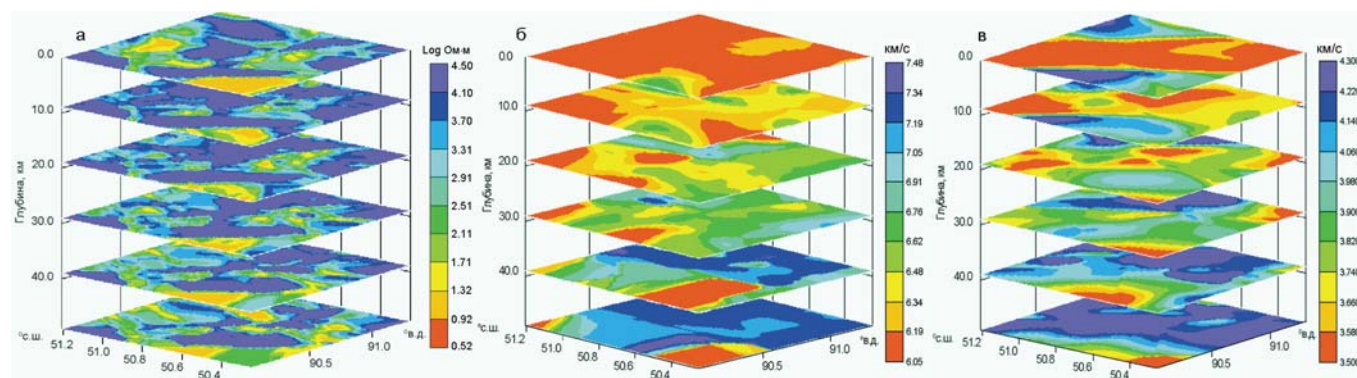


Рис. 2. Горизонтальные срезы трехмерных моделей удельного сопротивления (а), скоростей продольных (б) и поперечных (в) сейсмических волн

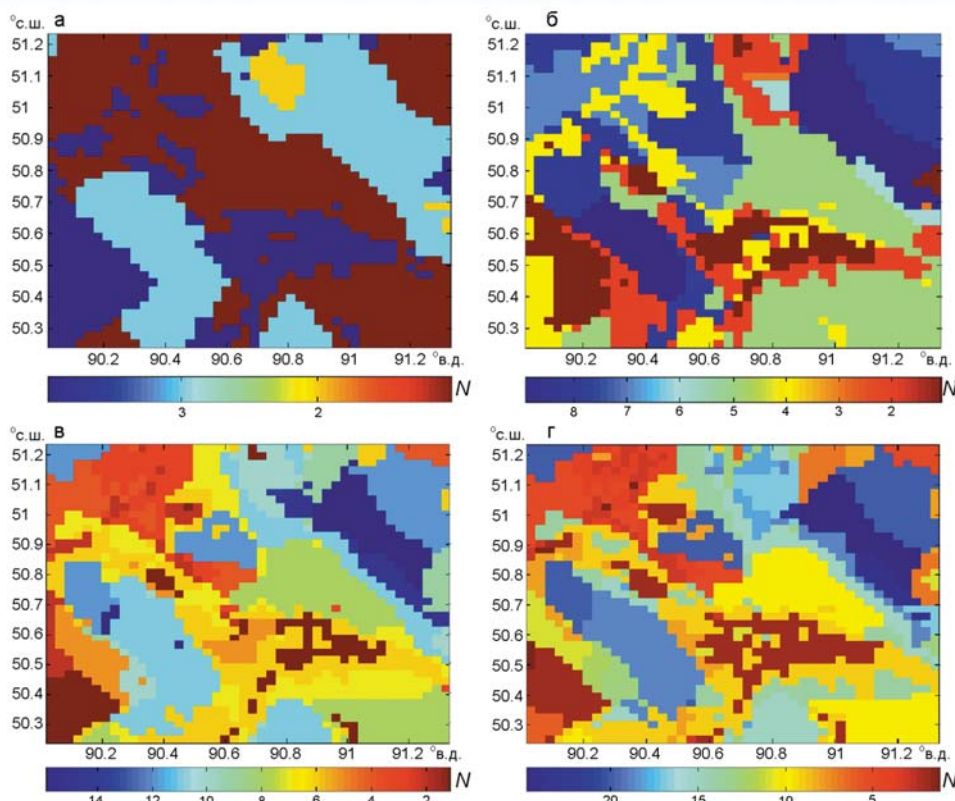


Рис. 3. Модельные кластерные срезы (на глубине 20 км) при числе кластеров $2 \times 2 = 4$ (а), $3 \times 3 = 9$ (б), $4 \times 4 = 16$ (в) и $5 \times 5 = 25$ (г)

Нейросетевые методы классификации, к которым можно отнести метод самоорганизующихся карт, основаны на обучении искусственной нейросети на примерах соответствия рассматриваемых физических параметров. При этом используются так называемые самоорганизующиеся карты, или искусственные нейросети «без учителя». Суть метода сводится к введению априорной информации о числе кластеров и обучению нейросети Кохонена выделению в исследуемом пространстве земных недр пространственных участков с однотипными характеристиками.

После окончания процесса обучения сеть Кохонена может классифицировать входные примеры на группы схожих элементов. Вся совокупность нейронов в выходном слое точно моделирует структуру распределения обучающих примеров в многомерном пространстве параметров. Таким образом, с помощью самоорганизующихся карт Кохонена происходит преобразование многомерного пространства физических свойств в пространство кластеров.

Этот подход к кластеризации был применен для построения кластерных пространственных моделей геофизических характеристик среды рассматриваемого участка. Для выполнения кластерного анализа применялась система MO STATISTICA Neural Networks 4. Технические результаты кластеризации оценивались по тестированию нейросети с использованием тестовой части геофизических данных. Кроме того, заранее проводилось исследование устойчивости результатов по отношению к априорно задаваемому числу кластеров, характеризующих разрешение структуры в про-

странстве параметров. Рис. 3 демонстрирует работу алгоритма сети Кохонена с геоэлектрическими и сейсмическими данными и показывает устойчивость структуры результирующих кластерных разрезов к заданию априорной информации о числе кластеров петрофизических свойств горных пород (4, 9, 16, 25 кластеров). На рис. 3 видно, что с ростом числа кластеров от 2×2 (а) до 5×5 (г) разрешение петрофизической структуры растет. При этом уже при переходе от 4×4 (в) к 5×5 (г) результирующие кластерные разрезы меняются незначительно, сохраняя структуру с небольшим уточнением деталей, что говорит об устойчивости их построения.

Кластерные модели геофизических характеристик среды.

По приведенной выше методике были построены пространственные кластерные модели для пар $\text{Log } R - V_p$, $\text{Log } R - V_s$, $\text{Log } R - V_p/V_s$, а также трех параметров $\text{Log } R - V_p - V_s$ (рис. 4), где R — удельное сопротивление, V_p и V_s — скорости продольных и поперечных сейсмических волн. В соответствии с приведенными выше результатами предварительного исследования в каждом случае все пространство значений параметров разделялось на 25 кластеров. Анализ кластерной модели, построенной по значениям логарифма удельного сопротивления и скоростей сейсмических волн, позволяет сделать следующие выводы.

С ростом глубин преобладают кластеры, характеризующиеся повышенными значениями сейсмических скоростей и удельного сопротивления ($\text{Log } R > 2,5$), которые могут соответствовать породам габброидного и перидотитного состава. На глубинах от поверхности до 15–20 км выделяются аномальные зоны (кластеры 24–25) пониженных продольных сейсмических скоростей, но повышенного удельного сопротивления ($> 10\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), типичных для зон раздробленности и трещиноватости. Они приурочены к областям расположения Шапшальской и Куртушибинской разломных зон земной коры, в окрестностях которых наблюдается повышенная сейсмичность. С другой стороны, локализация на глубинах средней и нижней коры кластеров 1–2, характеризующихся пониженными значениями скоростей как продольных, так и поперечных сейсмических волн, а также удельного сопротивления, может указывать на наличие зон частичного плавления.

Общая геометрия петрофизических кластеров в пространстве координат определяется поведением

сейсмических скоростей. Сопоставление рис. 4 с рис. 2в показывает, что при этом главным фактором являются скорости поперечных сейсмических волн. Другое важное наблюдение состоит в том, что в петрофизических кластерах практически не происходит взаимозаменяемости электрических и сейсмических параметров. Практически в каждой группе кластеров (1–5, 5–10, 10–15, 15–20), характеризующихся нарастающими сейсмическими скоростями, $\text{Log } R$ изменяется во всем диапазоне от 1 до 4,5.

Из этого следует важный для практики вывод о том, что инверсию электромагнитных и сейсмических данных вдоль опорных профилей не обязательно выполнять одновременно (в частности, в ходе совместной «структурной» инверсии). Согласно полученным результатам ее можно проводить последовательно, в два этапа: сначала по сейсмическим данным фиксировать геометрию аномальных зон, а затем по электромагнитным и гравиметрическим данным выявлять

в них распределение других физических свойств и их литологии.

Закключение. Таким образом, по геофизическим данным, измеренным вдоль опорных профилей на Тээлинском участке Алтае-Саянской складчатой области, построены трехмерные модели удельного сопротивления и сейсмических скоростей. Применение нейросетевых методов классификации, основанных на самоорганизующихся картах Кохонена, позволило построить на их основе трехмерную кластерную петрофизическую модель. По результатам ее анализа сделаны выводы о том, что общая геометрия аномальных зон в пространстве координат определяется поведением сейсмических скоростей (главным образом, поперечных), а свойства пород и литология — по другим геофизическим данным. Анализ построенной петрофизической кластерной модели позволил также выявить расположение областей трещиноватости в верхней коре, приуроченных к Шапшальской и Куртушибинской разломным зонам, а также зон частичного плавления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белявский В.В., Гойдина А.Г. Трехмерная геоэлектрическая модель металлогенических зон Кузнецко-Алатауской складчатой области // Физика Земли. — 2012. — № 11–12. — С. 97–117.
2. Егоркин А.В. Строение земной коры по сейсмическим геотраверсам / Глубинное строение территории СССР / Отв. ред. В.В. Белоусов, Н.И. Павленкова, Г.Н. Квятковская. — М.: Наука, 1991. — С. 67–95.
3. Кадурин, В.А., Белявский В.В., Егоркин А.В. и др. Геофизические исследования сейсморазведочными и электроразведочными методами глубинного строения Алтае-Саянской складчатой области по профилям общей протяженностью 3300 км. Организация и проведение режимных геофизических наблюдений на Тывинском полигоне. — М.: Росгеолфонд, 2008. — № 492309. — <http://www.rfgf.ru/catalog/>
4. Каплан С.А., Галуев В.И., Пиманова Н.Н., Малинина С.С. Комплексная интерпретация данных исследований на опорных профилях // Геоинформатика. — 2006. — № 3. — С. 38–46.
5. Никитин А.А., Каплан С.А., Галуев В.И., Малинина С.С. Определение физико-геометрических свойств земной коры по данным геофизического комплекса // Геоинформатика. — 2003. — № 2. — С. 29–38.
6. Спичак В.В. Магнитотеллурические поля в трехмерных моделях геоэлектрики. — М.: Научный мир, 1999.
7. Спичак В.В. Современные подходы к комплексной инверсии геофизических данных // Геофизика. — 2009. — № 5. — С. 10–19.
8. Спичак В.В., Безрук И.А., Гойдина А.Г. Построение трехмерной геоэлектрической модели в окрестности участка регионального профиля 1-СБ в Восточной Сибири на основе комбинированной инверсии профильных и площадных МТ данных // Геофизика. — 2010. — № 2. — С. 54–59.
9. Спичак В.В., Безрук И.А., Попова И.В. Построение глубинных кластерных петрофизических разрезов по геофизическим данным и прогноз нефтегазоносности территорий // Геофизика. — 2008. — № 5. — С. 43–45.
10. Спичак В.В., Гойдина А.Г. Нейросетевое моделирование сейсмических скоростей и удельного сопротивления пород по геоэлектрическим и сейсмическим данным соответственно // Геофизика. — 2013. — № 3. — С. 12–18.
11. Спичак В.В., Гойдина А.Г. Геофизические индикаторы эндогенных рудных месторождений (на примере Сорского медно-молибденового комплекса) // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 10. — С. 11–14.
12. Черемисина Е.Н., Галуев В.И., Каплан С.А., Малинина С.С. Методика выделения опорных глубинных границ изменения физических свойств пород для решения задач интегрирования геоинформации при региональных геофизических исследованиях // Геоинформатика. — 2006. — № 1. — С. 50–53.

© Спичак В.В., Безрук И.А., Гойдина А.Г., 2015

Спичак Вячеслав Валентинович // v.spichak@mail.ru
Безрук Игорь Андреевич // iganbez@mail.ru
Гойдина Александра Григорьевна // goidinaa@mail.ru

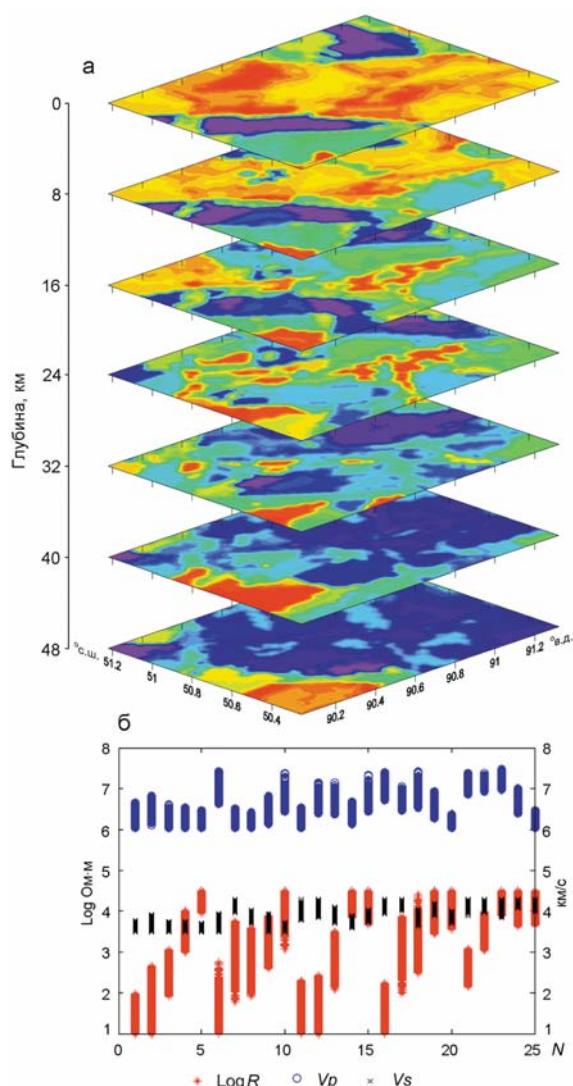


Рис. 4. Срезы кластерной объемной модели (а), построенной по значениям удельного сопротивления ($\text{Log } R$) и скоростям продольных (V_p) и поперечных (V_s) сейсмических волн, и диапазоны значений параметров (б), соответствующих номерам кластеров (N)

УДК 550.34.343

Волейшо В.О. (ФГУП «ВСЕГИНГЕО»)

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

*Анализ данных гидрогеодинамического (ГГД) мониторинга сейсмоактивных регионов России на основе электромагнитной модели эволюции сейсмического процесса показывает, что подготовка сейсмического события и его завершение имеет космическо-планетарную, регионально-очаговую природу. Механизм всех природных землетрясений связан с огненно-взрывным процессом, который управляется электромагнитными силами. **Ключевые слова:** землетрясение, модель, магнит, прогноз, аномалия, космос.*

Voleysho V.O. (VSEGINGEO)

CONCEPTUAL MODEL OF SEISMIC PROCESS EVOLUTION

*The data analysis of the hydrogeodynamic (HGD) monitoring of seismically active regions in Russia, made on the basis of an electromagnetic model of the seismic process evolution, shows that the preparation of a seismic event and its completion have a cosmic-planetary and regional seismic-focus nature. The mechanism of all the natural earthquakes is connected with a fiery-explosive process governed by electromagnetic forces. **Key words:** earthquake, model, magnet, prediction, anomaly, cosmos.*

Причина неуспеха в решении проблемы краткосрочного прогноза сильных землетрясений совершенно справедливо связывается с не адекватным представлением и пониманием реальных природных процессов, контролирующих сейсмичность различного уровня.

В настоящее время сформулированы два подхода к прогнозу сильных коровых землетрясений. Представления о процессе разрушения лабораторных монолитных образцов переносятся на условия литосферы и анализируется двухстадийная модель подготовки разрушения [11]. На протяжении последних 30 лет XX в. научные программы по прогнозу сильных землетрясений создавались на основе теоретических предпосылок о процессах их подготовки и развития: в виде дилатантно-диффузионной (ДД) модели в США и модели лавинно-неустойчивой трещиноватости (ЛНТ) в России. Накопленный опыт лабораторного моделирования сейсмического процесса не приблизил к решению сложной проблемы прогноза места, силы и времени (в краткосрочном периоде) сильных землетрясений. Обнаруженная полевыми методами изменчивость физико-химических параметров геологической среды в широком пространственно-временном диапазоне нельзя было понять и тем более объяснить с позиции лабораторных моделей.

Убедительными оказались факты, свидетельствующие о том, что выявленные геофизические аномалии не были связаны с очаговыми областями произошедших землетрясений. Природа аномалии связана только с изменением физических свойств геологической среды непосредственно в пункте наблюдения. Однако тревоги, объявляемые по аномальным эффектам, проявляющимся в различных геофизических полях на полигонах, не случайно совпадали по времени с землетрясениями, а указывали на то, что аномалии этих полей в пунктах наблюдений и сильные землетрясения являются следствием одного и того же процесса изменения геофизического состояния пород на огромных территориях в результате колебания геомагнитного поля. Сильные землетрясения, произошедшие в 1980-х годах в Китае, Иране, Средней Азии, и аномальные эффекты в геолого-геофизических полях, наблюдаемые на больших расстояниях от очагов этих землетрясений, убедительно подтвердили региональный характер процессов, предвещающих сильные землетрясения.

Создание специализированной региональной гидрогеологической наблюдательной сети в целях прогноза сильных землетрясений, начатое в 1980 г. ВСЕГИНГЕО и производственными геологическими организациями Мингео СССР, было завершено в 1985 г.

Принципиальной проблемой оставался способ выбора наиболее информативных прогностических показателей, которых к тому времени насчитывалось более 300.

Для оценки информативности геолого-геофизических показателей, контролирующих подготовку сильных землетрясений, в 1984 г. сотрудниками ВСЕГИНГЕО [2] был запатентован способ оценки пригодности гидрогеологического или геофизического объекта наблюдения для изучения геодинамических процессов. Информативность прогностических показателей оценивалась по их реакции на лунно-солнечные приливные возмущения (геограмма Земли), вызывающие на поверхности планеты относительные деформации сжатия и растяжения, которые по своему воздействию на верхнюю часть земной коры являются аналогом напряженно-деформационных процессов при подготовках сильных землетрясений. Среди преимуществ этого способа следует отметить:

- 1) информативность самого показателя с одновременным контролем пригодности пункта наблюдения и аппаратуры для измерений показателя;
- 2) использование изменяющегося во времени природного сигнала накануне землетрясения для краткосрочного прогноза;
- 3) возможность учета различий геофизических характеристик горных пород по величине их реакции на одинаковые возмущения.

Для региональной сети гидрогеологических наблюдений в качестве информативного показателя принято