

# ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ «МОКРОВО» (ЮХНОВСКИЙ РАЙОН, КАЛУЖСКАЯ ОБЛАСТЬ) КОМПЛЕКСОМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

## STUDY OF MAGNETIC ANOMALY MOKROVO (YUKHNOVSKY DISTRICT, KALUGA REGION) BY COMPLEX OF GEOPHYSICAL METHODS

### КУЛИКОВ В.А.

Доцент кафедры геофизических методов исследований земной коры геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., г. Москва, vic@nw-geophysics.ru

### ЕРМАКОВ А.П.

Ведущий научный сотрудник кафедры сейсмологии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, ermakov@geol.msu.ru

### КАМИНСКИЙ А.Е.

Главный разработчик ПО, ООО «Zond Software», г. Санкт-Петербург, kaminae@yandex.ru

### КОСОРУКОВ В.Л.

Старший преподаватель кафедры литологии и морской геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, kosorukov-vladimir@rambler.ru

### ПАЛЕНОВ А.Ю.

Ассистент кафедры геофизических методов исследований земной коры геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, palenov@mail.ru

### СОЛОВЬЕВА А.В.

Аспирант кафедры геофизических методов исследований земной коры геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, nastya\_soloway@rambler.ru

### ТУРЧКОВ А.М.

Ассистент кафедры сейсмологии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, turchkov@gmail.com

### ШУСТОВ Н.Л.

Научный сотрудник кафедры геофизических методов исследований земной коры геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, nickshus@gmail.com

### KULIKOV V.A.

Associate Professor of the Department of Geophysical Methods of Earth Crust Study, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, vic@nw-geophysics.ru

### ERMAKOV A.P.

Leading Research Scientist of the Department of Seismometry and Geoacoustics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, ermakov@geol.msu.ru

### KAMINSKY A.E.

Chief Developer of Software, Zond Software Ltd., St. Petersburg, kaminae@yandex.ru

### KOSORUKOV V.L.

Senior Lecturer of the Department of Lithology and Marine Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, kosorukov-vladimir@rambler.ru

### PALENOV A.Yu.

Assistant Lecturer of the Department of Geophysical Methods of Earth Crust Study, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, palenov@mail.ru

### SOLOVIEVA A.V.

Postgraduate Student of the Department of Geophysical Methods of Earth Crust Study, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, nastya\_soloway@rambler.ru

### TURCHKOV A.M.

Assistant Lecturer of the Department of Seismometry and Geoacoustics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, turchkov@gmail.com

### SHUSTOV N.L.

Research Scientist of the Department of Geophysical Methods of Earth Crust Study, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, nickshus@gmail.com

### Ключевые слова:

магниторазведка; электроразведка; сейсморазведка; вертикальное электрическое зондирование методом вызванной поляризации (ВЭЗ-ВП); многочастотные измерения вызванной поляризации; комплексная интерпретация.

### Key words:

magnetic survey; electrical survey; seismic survey; induced polarization vertical electrical sounding (IP-VES); multifrequency measurements of induced polarization (IP); complex interpretation.

### Аннотация

В статье приводятся результаты комплексных геофизических изысканий, выполненных с целью изучения природы магнитной аномалии, выявленной на правом берегу р. Сохна в Юхновском районе Калужской области. Благодаря использованию широкого набора современных геофизических методов — детальной магнитной съемки, электрического многочастотного профилирования, сейсморазведки МПВ и MOV-ОГТ, наземной и скважинной электротомографии, а также метода спектральной вызванной поляризации (СВП) была построена детальная геолого-геофизическая модель верхней части разреза.

Высокие значения магнитной восприимчивости и электрической поляризуемости связаны с обогащенными железом глинами четвертичного возраста, которые накапливались в слабопроточном глубоком бассейне с большим содержанием органики.

### Abstract

This article shows the results of the complex geophysical researches, which were executed for the purpose of studying of the nature of the magnetic anomaly, revealed on the right coast of the Sohna river in Yukhnovsky district of the Kaluga region. Thanks to a wide set of modern geophysical methods — detailed magnetic survey, electric multifrequency profiling, seismic exploration of MPV and MOV-OGT, land and bore-hole electrotomography, and also a method of the spectral caused polarization (SVP), the detailed geologic-geophysical model of the top part of a section has been constructed. High values of a magnetic susceptibility and electric polarizability are connected with the clays of quarternary age enriched with iron, which have been collected in the incompetent deep pool with high content of organic chemistry.

## Введение

В рамках проведения научно-учебных практик со студентами-геофизиками геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова были выполнены комплексные геофизические исследования по изучению слабоконтрастной магнитной аномалии «Мокрово», расположенной в 11 км к юго-востоку от учебно-научной базы МГУ «Александровка» [4].

Геофизический комплекс был представлен широким спектром методов инженерной геофизики: наземной магниторазведкой и гравиразведкой, электротомографией, зондированием становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), сейсморазведкой МОВ-ОГТ и МПВ и другими методами. На основании результатов наземных геофизических исследований была пробурена разведочная скважина, в которой были выполнены измерения методом кажущихся сопротивлений и вызванной поляризации, проведена каппаметрия и рентгенофлюоресцентный анализ керна.

В данной работе представлены обобщенные результаты геофизических измерений, выполненных по одному из профилей (№ 1), пересекающему магнитную аномалию. На этом профиле были проведены многочастотные измерения методом вертикального электрического зондирования с измерением вызванной поляризации в широком спектре частот (ВЭЗ-СВП), сейсморазведочные и магнитные измерения, которые послужили основой для создания геолого-геофизической модели.

## Магниторазведка и электропрофилирование

Для изучения границ аномальной зоны в плане на первом этапе работ были выполнены измерения магнитного поля и площадные работы методом электропрофилирования с измерением вызванной поляризации (ЭП-ВП) по регулярной сети профилей северо-восточного направления в масштабе 1:2500.

Измерения методом ЭП-ВП проводились трехэлектродной установкой AMN (АО=15 м) с использованием портативной электроразведочной аппаратуры производства ООО «Северо-Запад». Расчет кажущейся поляризуемости ( $\eta_k^{DPP}$ ) осуществлялся по дифференциальному фазовому параметру (ДФП) [5] на двух частотах — 0,6 и 19 Гц.

Измерения магнитного поля выполнялись с использованием магнитометров ММПРС-1. Первичная обработка данных заключалась в учете вариаций геомагнитного поля и введении поправки за вековой ход вариаций. Параметры нормального магнитного поля вычислялись по модели IGRF11 и составили для участка работ: склонение восточное  $9,9^\circ$ , наклонение  $70,62^\circ$ , модуль вектора магнитного поля — 51 128 нТл. Эти параметры нормального поля использовались при дальнейшей инверсии данных магниторазведки.

По результатам площадных работ была выделена и оцифрована комплексная геофизическая аномалия размером  $270 \times 130$  м, протягивающаяся вдоль правого берега р. Сохны. В центре выделенной области значения аномального магнитного поля  $\Delta T_a$  составляют 35 нТл (рис. 1, а), кажущиеся сопротивления опускаются ниже 20 Ом·м (рис. 1, б), значения кажущейся поляри-

зуемости  $\eta_k^{DPP}$  достигают 3,5% на частоте 0,6 Гц и 8,5% на частоте 19 Гц (рис. 1, в).

На основании результатов площадных работ можно сделать следующие выводы. Комплексная геофизическая аномалия «Мокрово» связана с областью развития проводящих пород — суглинков или глин. Аномалия магнитного поля в общих чертах пространственно совпадает с аномалией кажущейся поляризуемости, но есть и различия в картах  $\Delta T_a$  и  $\eta_k^{DPP}$ . Например, максимальные значения кажущейся поляризуемости наблюдаются в северо-западной части аномалии, а магнитного поля — в ее юго-восточной ча-

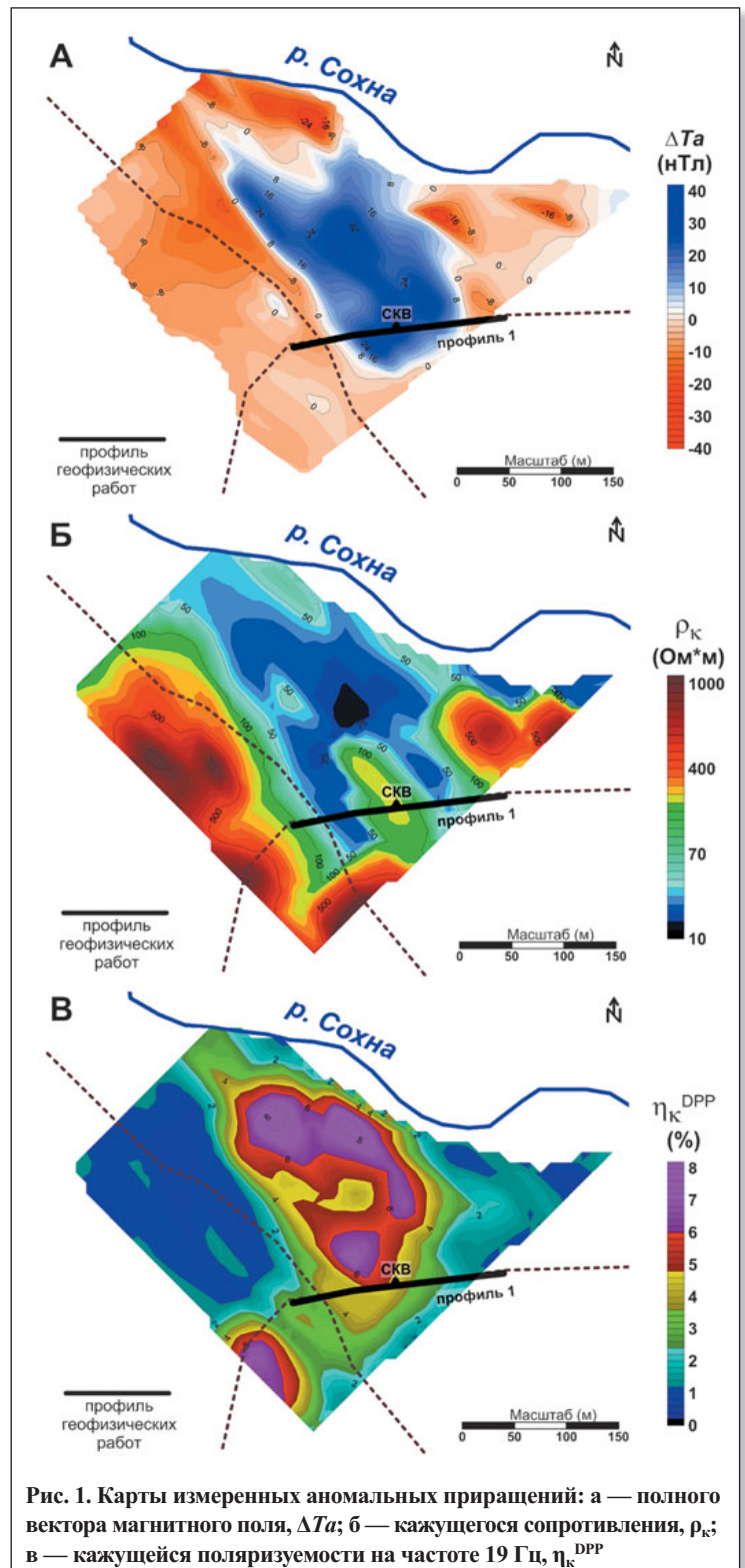


Рис. 1. Карты измеренных аномальных приращений: а — полного вектора магнитного поля,  $\Delta T_a$ ; б — кажущегося сопротивления,  $\rho_k$ ; в — кажущейся поляризуемости на частоте 19 Гц,  $\eta_k^{DPP}$

сти. Значения  $\eta_k^{DPP}$  на частоте 19 Гц почти в 3 раза превышают значения  $\eta_k^{DPP}$  на частоте 0,6 Гц. Это говорит о малой длительности процессов релаксации вызванной поляризации.

На втором этапе для изучения аномалиеобразующего объекта в вертикальной плоскости были выполнены сейсмические и электроразведочные зондирования по широтному профилю № 1 (см. рис. 1), пересекающему комплексную геофизическую аномалию в ее южной части. Выбор профиля был обусловлен техническими и экологическими ограничениями на участке работ.

### Методика, аппаратура и результаты исследований МОВ-ОГТ

Сейсмические исследования методом отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) на поперечных волнах проводились по профилю № 1 вдоль одной приемной линии (см. рис. 1). Шаг пунктов приема (ПП) составлял 2 м, шаг по пунктам возбуждения сигнала (ПВ) — 4 м. Общее количество активных каналов в пределах приемной линии составило 85. Максимальная кратность перекрытий достигала 42 в середине расстановки. Регистрация *SH*-волн осуществлялась по методике разнонаправленных ударов, предложенной А.Г. Скворцовым [8].

Для полевых измерений использовалась специализированная сейсмическая телеметрическая цифровая станция «ТЭЛСС-3» (ООО «Геосигнал», г. Москва), сейсмоприемники GS-20DX (ООО Geospace Technologies Eurasia, г. Уфа, по лицензии корпорации OYO Geospace, США) с горизонтальной осью максимальной чувствительности, сейсмические 4-канальные кося. Результатом полевых измерений явились сейсмограммы общего пункта возбуждения (ОПВ), которые были подвергнуты математической обработке в программном пакете RadExPro (ООО «Деко-геофизика», г. Москва). Пример исходных полевых сейсмограмм показан на рис. 2.

Математическая обработка полевых материалов проводилась сотрудниками кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ им. М.В. Ло-

моносова. Подобранный граф обработки включал в себя следующие процедуры:

- ввод геометрии сейсмических наблюдений (координат ПВ, ПП, ОГТ, удалений);
- вычитание сейсмограмм ОПВ, соответствующих разнонаправленным возбуждениям;
- сортировка сейсмограмм по общим глубинным точкам (ОГТ);
- предварительная обработка сейсмограмм ОГТ (полосовая частотная фильтрация, амплитудная коррекция);
- скоростной анализ и ввод кинематических поправок;
- суммирование по ОГТ;
- двумерная фильтрация и фильтрация в двумерной спектральной области ( $F, K$ ), где  $F$  — циклическая частота, Гц;  $K$  — волновое число,  $m^{-1}$ ;
- перевод временного разреза в глубинный масштаб.

### Методика, аппаратура и результаты исследований методом МПВ

Сейсмические исследования методом преломленных волн (МПВ) на продольных волнах проводились по профилю длиной 282 м (см. рис. 1). Шаг пунктов приема составлял 2 м, пункты возбуждения (ПВ) в пределах приемной линии располагались с шагом 16 м. Для увеличения длины годографов первых вступлений преломленных волн и, соответственно, глубинности исследований использовались два выносных ПВ. Общее количество пунктов возбуждения на профиле составило 25. Максимальная длина годографов с учетом выносных ПВ составила 142 м, что для района работ обеспечивает глубинность исследований около 35 м.

Для полевых измерений использовались две специализированные цифровые сейсмические 24-канальные станции «Лакколит X-M2» (ООО «Логис», г. Жуковский), сейсмоприемники марки GS-20DX с вертикальной осью максимальной чувствительности, две сейсмические 24-канальные кося. Результатом полевых измерений явились сейсмограммы ОПВ.

На полевых сейсмограммах ОПВ были оцифрованы времена первых вступлений преломленных волн и

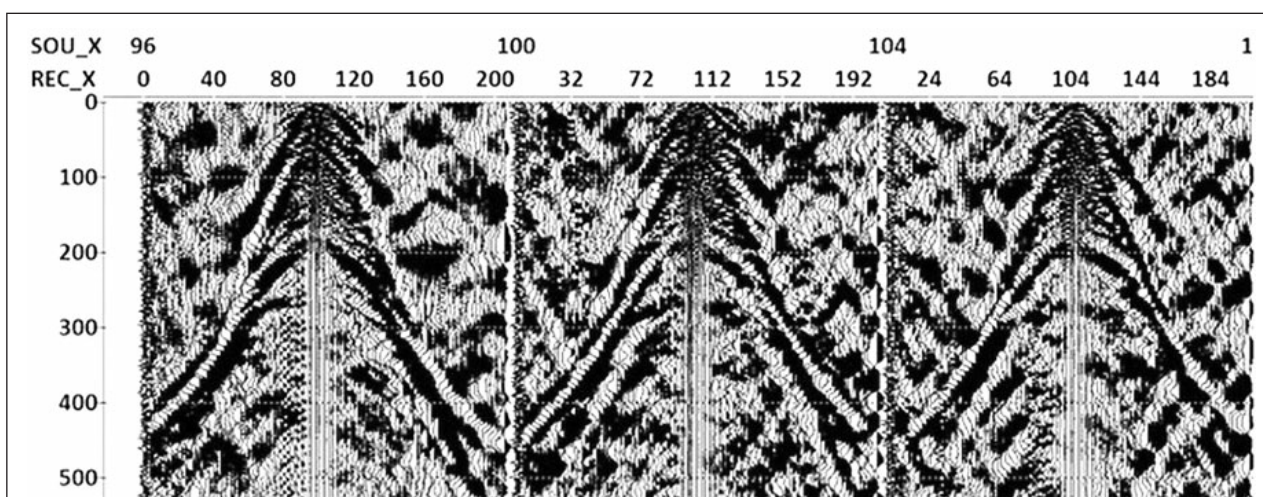


Рис. 2. Пример исходных полевых сейсмограмм ОПВ. Метод МОВ-ОГТ, поперечные волны. На оси ординат отложено время в мс; на оси абсцисс: REC\_X — координаты пунктов приема, SOU\_X — координаты пунктов возбуждения

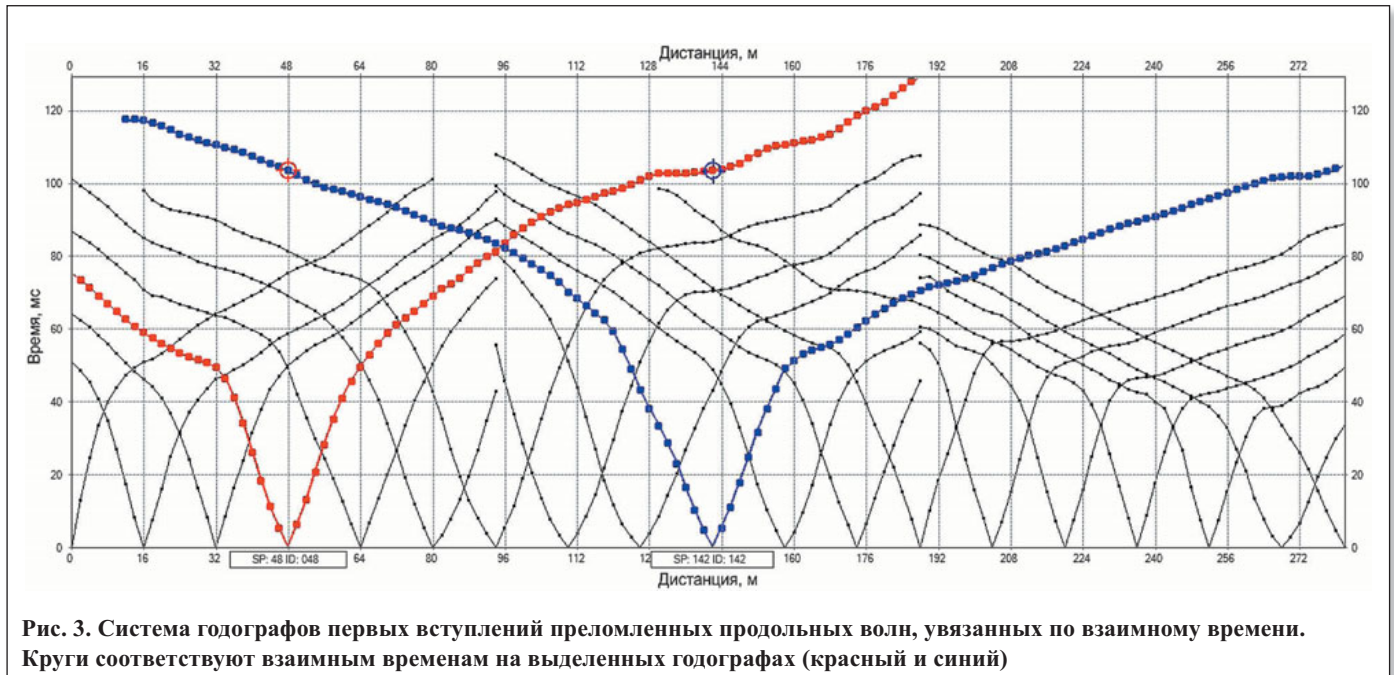


Рис. 3. Система годографов первых вступлений преломленных продольных волн, увязанных по взаимному времени. Круги соответствуют взаимным временам на выделенных годографах (красный и синий)

сформирована система годографов преломленных волн, увязанных по взаимному времени с точностью не хуже 1 мс (рис. 3).

Интерпретация системы годографов первых вступлений проводилась в программном пакете «Годограф», разработанном на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (автор В.Б. Пийп) с помощью метода однородных функций, который предполагает двумерно-неоднородную модель среды и не требует начальной модели [7].

### Предварительные результаты сейсмических исследований

Глубинный разрез по результатам МОВ-ОГТ и глубинно-скоростной разрез по результатам МПВ по профилю № 1 представлены на рис. 4. Над разрезами приведен график аномального магнитного поля.

В центральной части профиля по результатам обоих методов выявляется отрицательная структура: симметричный прогиб с пологими углами наклона границ (около  $7^\circ$ ). Границы выделенной структуры практически зеркально отражают график аномального магнитного поля. Самая яркая граница по результатам метода ОГТ на флангах профиля располагается на глубинах 6–8 м и погружается в центральной части до глубины 19 м. Параллельно ей несколько ниже по разрезу прослеживается еще одна граница, показанная на разрезе пунктирной линией. В восточной части профиля на глубинах около 30 м по результатам ОГТ наблюдается другая граница, падающая на запад под углом около  $15^\circ$ . В центре профиля эта граница прерывается.

Породы, расположенные в приповерхностной части выше яркой отражающей границы, характеризуются скоростями распространения продольных волн от 500 до 1000 м/с. На глубинах 15–20 м наблюдается резкое изменение скоростей до значений 1600–1800 м/с. Следующее возрастание скоростей до 2200 м/с наблюдается на глубинах 30–35 м.

На восточном фланге профиля на глубинах 20–25 м в разрезе фиксируется локальная низкоскоростная аномалия.

### Методика и предварительные результаты работ методом ВЭЗ-СВП

Исследования методом вертикального электрического зондирования с измерением вызванной поляризации в широком спектре частот (ВЭЗ-СВП) выполнялись вдоль профиля № 1 с шагом 10 м в центре профиля и 20 м на флангах профиля. Общее количество измерений — 16 фактических точек. Измерения проводились с помощью четырехэлектродной симметричной установки AMNB. Разносы питающих электродов, длины приемных линий и шаг по профилю в используемой установке были подобраны таким образом, чтобы приемные и питающие электроды многократно заземлялись в одни и те же места, как это реализовано в электротомографии [1]. Диапазон разносов питающей линии ( $AB/2$ ) составил 3–125 м. Длины приемных линий MN: 2 и 14 м.

При проведении работ методом ВЭЗ-СВП использовался портативный электроразведочный генератор «АСТРА» и многоканальный измеритель «ИМВП» (производство ООО «Северо-Запад», г. Москва) [6]. Обработка сигнала проводилась с помощью программного комплекса «Octopus Pro» (автор А.И. Гераськин). Измерения проводились на 9 частотах: 0,076; 0,15; 0,3; 0,6; 1,22; 2,44; 4,88; 9,76 и 19 Гц.

На рисунке 5 представлены псевдорезрезы кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ) и кажущейся поляризуемости ( $\eta_k^{DPP}$ ) от разноса. Над разрезами приведен график локальной составляющей аномального магнитного поля.

Магнитной аномалии отвечает область пониженных значений кажущегося сопротивления. В районе точек ВЭЗ № 9–13 на малых разносах наблюдается локальная высокоомная аномалия  $\rho_k$ , предположительно связанная с маломощной приповерхностной линзой песка.

Псевдорезрез кажущейся поляризуемости построен для частоты 19 Гц. Область высоких значений  $\eta_k^{DPP} (> 2,5\%)$  фиксируется на разносах от 10 до 30 м в центре профиля и совпадает с максимальными значениями  $\Delta T_a$ .

### Результаты измерений в скважинах и на керне

Для выяснения геологической природы аномалии «Мокрово» в районе точки ВЭЗ-СВП № 7 была пробурена скважина глубиной 20 м с отбором керна.

В интервале глубин от 0 до 4 м скважиной вскрыты пески с небольшим включением гравия. В интервале глубин 4–19 м вскрыта толща переслаивающихся глин и суглинков, а на глубине 19–20 м буровой инструмент вошел в песок. Водоносный горизонт скважиной вскрыт не был, скважина сухая. Учитывая, что урез воды в протекающей рядом р. Сохне располагается на абсолютной отметке 130 м, можно предположить, что породы, залегающие под толщей глин, полностью обводнены.

В скважине с помощью трехэлектродной установки А0,5М0,5N были выполнены многочастотные измерения кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости (рис. 6, а, б). Также были выполнены измерения магнитной восприимчивости (рис. 6, в) и рентгенофлуоресцентный (РФА) анализ керна с шагом 10 см.

По результатам скважинных измерений на глубинах 14–16 м выделяется интервал с аномальными физическими свойствами горных пород. На этом интервале кажущаяся поляризуемость на частоте 19 Гц превышает значения 6%, кажущееся сопротивление опускается до 30 Ом·м, а магнитная восприимчивость достигает 1000 и более ед. СИ. Еще один интервал с повышенными значениями кажущейся поляризуемости фиксируется на глубинах 10–12 м.

На кафедре литологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова было проведено определение минерального состава образцов керна методом рентгенофазового анализа. По результатам анализов установлено, что все образцы в интервале 6–15 м представлены глинами. В исследованных породах не

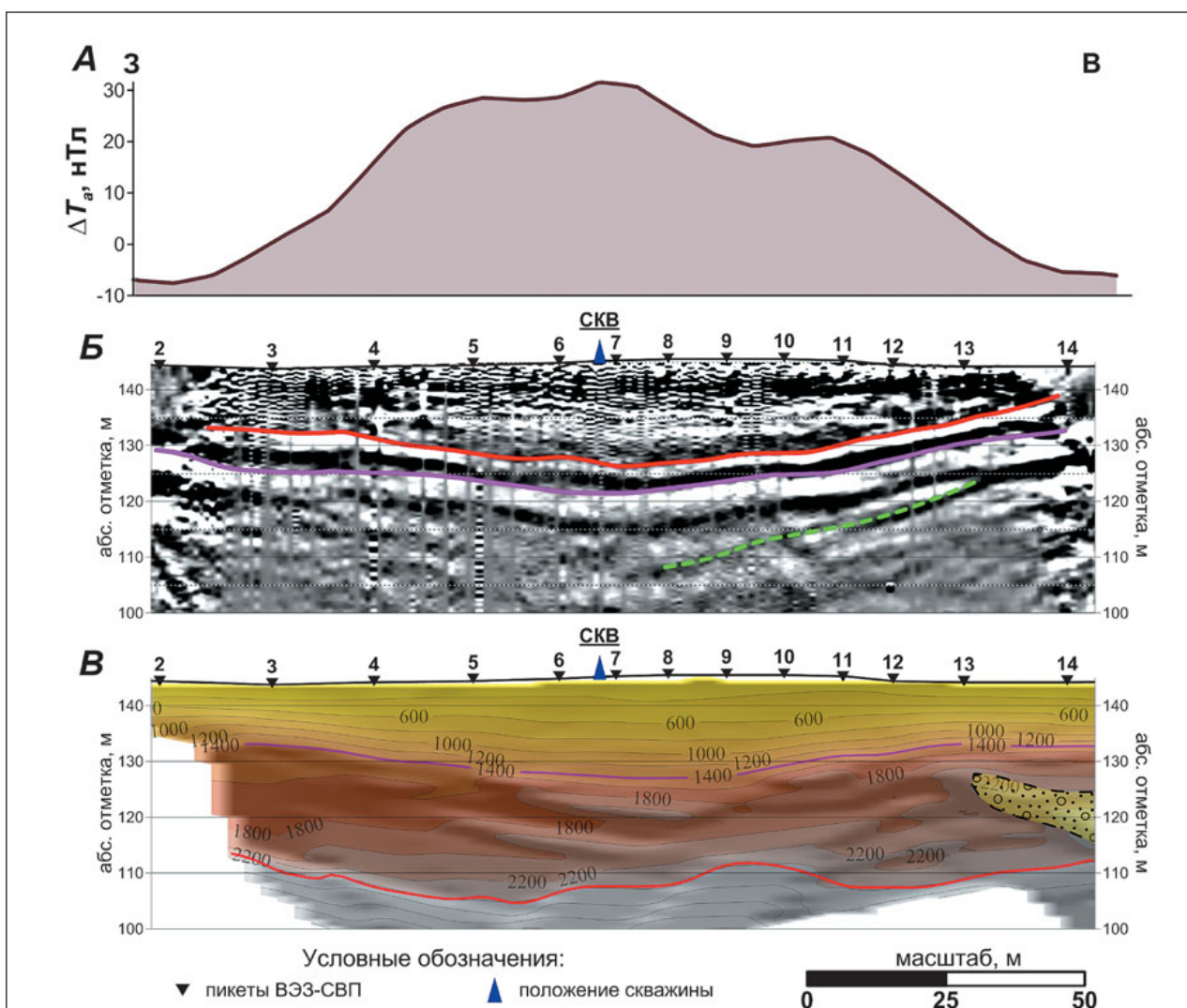


Рис. 4. Результаты сейсмических работ по профилю № 1: а — график аномального приращения полного вектора магнитного поля  $\Delta T_a$ , нТл; б — глубинный сейсмический разрез по данным МОБ-ОГТ (рисунок представлен в виде разреза переменной плотности: абсолютно белый цвет соответствует минимумам амплитуд сейсмических волн, абсолютно черный цвет соответствует максимумам амплитуд); в — глубинный сейсмический разрез в изолиниях скорости распространения продольных волн, полученный по данным МПВ, сечение изолиний — 200 м/с

обнаружены магнитные минералы в кристаллической фазе. Из железосодержащих минералов присутствуют пирит и манганосидерит. Высокая магнитная восприимчивость пород может быть связана с наличием аморфных магнитных минералов железа в тонкодисперсном состоянии.

### Количественная интерпретация данных ВЭЗ-СВП, сейсморазведки и магниторазведки

На основе количественной интерпретации всех геофизических данных по профилю № 1 была сформирована геолого-геофизическая модель объекта «Мокрово». Учитывая специальные геометрические параметры используемой электроразведочной установки, интерпретация данных ВЭЗ-СВП выполнялась в программе двумерной автоматической инверсии Zond-Res2D (автор А.Е. Каминский). Стартовая модель была сформирована на основе глубинного сейсмического разреза, полученного МОВ-ОГТ (см. рис. 4, б). Для инверсии были выбраны данные, полученные на самой высокой частоте — 19 Гц.

График аномального приращения полного вектора магнитного поля  $\Delta T_a$  представлен на рис. 7, а. Модель удельного электрического сопротивления представлена на рис. 7, б и имеет следующие отличительные черты. В восточной части профиля (точки ВЭЗ № 7–13) в приповерхностной части разреза проявляется высокоомная линза песка мощностью до 5–6 м. На глубинах 10–15 м над яркой отражающей границей фиксируется незначительный по мощности слой глины низкого сопротивления. Этот слой наиболее ярко проявляется в восточном борту мульды. На глубинах более 20 м в центральной части профиля наблюдается субвертикальная граница между проводящим западным блоком и высокоомным восточным. В этом месте оси синфазности отраженных волн на глубинных разрезах ОГТ не наблюдаются.

Поляризационная модель приведена на рис. 7, в. В разрезе выделяется узкий поляризующийся горизонт, расположенный над главной отражающей границей. В пределах этого слоя поляризуемость изменяется от 3 до 8%. Максимальные значения поляризуемости приходятся на участок между 5-й и 8-й точ-

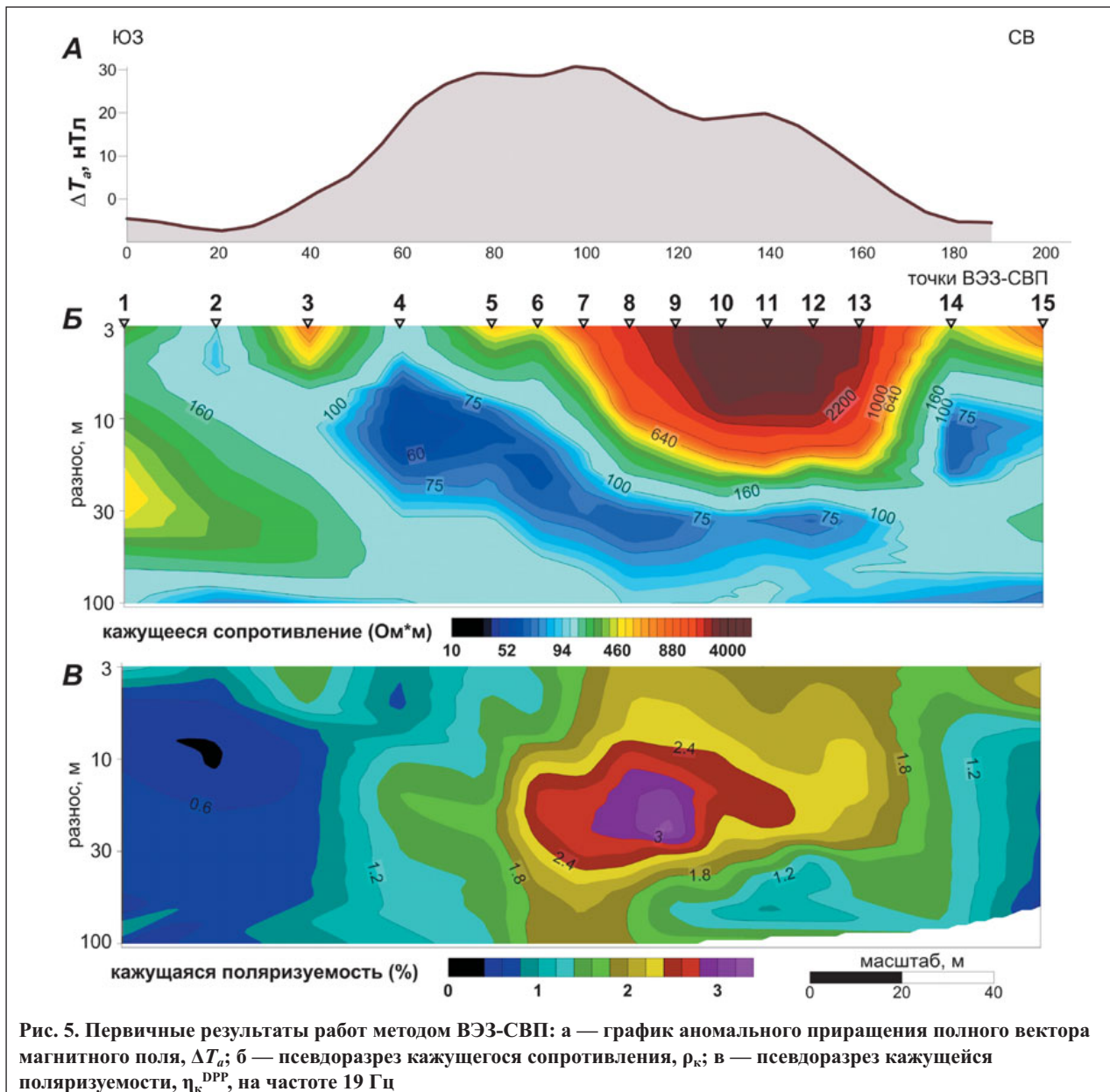


Рис. 5. Первичные результаты работ методом ВЭЗ-СВП: а — график аномального приращения полного вектора магнитного поля,  $\Delta T_a$ ; б — псевдоразрез кажущегося сопротивления,  $\rho_k$ ; в — псевдоразрез кажущейся поляризуемости,  $\eta_k^{DPP}$ , на частоте 19 Гц

ками ВЭЗ-СВП. Нетрудно заметить высокую корреляцию между поляризуемостью этого горизонта и аномальными значениями магнитного поля. В верхней части модели общий фон значений поляризуемости повышенный, составляет около 3%. Повышенные значения поляризуемости фиксируются в центральной зоне до больших глубин.

На рисунке 7, *z* представлена модель магнитной восприимчивости, подобранная на основе двух предыдущих моделей. Горизонт мощностью 3–4 м, создающий магнитную аномалию, относится к основанию «мульды». Наибольшие значения магнитной восприимчивости наблюдаются на западном борту и совпадают с областями больших значений поляризуемости.

Представленные на рис. 7 двумерные модели подобраны с минимальной невязкой между полевыми и модельными данными (значения невязки показаны над разрезами). Модели согласуются с результатами измерений в скважине и на керне.

### Совместная инверсия ВЭЗ-СВП и МПВ в программе ZondRes2D

На сегодняшний день известны три возможных варианта совместной инверсии разных геофизических методов. Первый, чаще всего используемый в нефтяной сейсморазведке, основан на корреляционных свойствах параметров и требует большого объема априорной информации. Второй вариант базируется на предположении о едином образе контрастности двух пет-

рофизических разрезов и представляет не совместную, а последовательную инверсию. Третий вариант инверсии построен на использовании общих границ между блоками с различными петрофизическими характеристиками горных пород, которые могут быть зафиксированы или изменяться для произвольно-слоистой среды. По сути, границы являются тем параметром, который связывает два геофизических метода.

В случае произвольно-слоистой среды модель представлена набором слоев, геометрия границ которых и изменение параметров внутри каждого слоя произвольны («мягкая» 2D-задача). В программе ZondRes2D, где реализован алгоритм совместной инверсии различных геофизических параметров, модель задается следующим образом: устанавливается количество слоев, узлов геометрии и узлов изменения параметров внутри каждого слоя (в нашем случае — удельного электрического сопротивления и скорости распространения сейсмических волн).

Произвольно-слоистая модель обладает явными преимуществами, среди которых стоит отметить геологическую обоснованность получаемого разреза и возможность проведения совместного подбора по данным нескольких геофизических методов в рамках единой геометрии границ.

При решении обратной задачи используется регуляризованный метод наименьших квадратов с ограничением гладкости подбираемых параметров. Для различных типов параметров конструируются отдельные операторы гладкости, что позволяет контролировать гладкость каждого. Алгоритм позволяет также задать вес данных для каждого из используемых методов. В тех случаях, когда методы связаны только через общие границы, это может сыграть ключевую роль при поиске совместной модели.

Ниже приведен использованный вариант функционала невязки совместной инверсии данных ВЭЗ и МПВ:

$$\begin{aligned} (A^T W_d^T W_d A + \lambda W_m^T W_m) \Delta m = \\ = A^T W_d^T W_d (f(m) - f) - \lambda W_m^T W_m (m - m_0), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A^T$  — транспонированная матрица частных производных;  $W_d^T$  — транспонированный вектор весов измерений;  $W_d$  — вектор весов измерений (произведение индивидуального веса измерения на вес метода);  $A$  — матрица частных производных  $\partial f(m)/\partial m$ ;  $\lambda$  — параметр регуляризации;  $W_m^T$  — транспонированный оператор гладкости;  $W_m$  — оператор, обеспечивающий гладкость границ и параметров внутри слоя при инверсии;  $m$  — вектор нормированных параметров (удельные сопротивления, скорости сейсмических волн и геометрия слоев);  $m_0$  — вектор нормированных параметров опорной модели;  $f(m)$  и  $f$  — нормированные значения рассчитанных и наблюдаемых измерений (кажущиеся сопротивления и времена прихода сейсмических волн).

При использовании данного алгоритма существуют некоторые ограничения. В рамках произвольно-слоистой модели не рекомендуется работать с высоконтрастными двумерными средами. Восстановить границы локальных объектов можно только при высокой плотности узлов сетки. Данные электрической

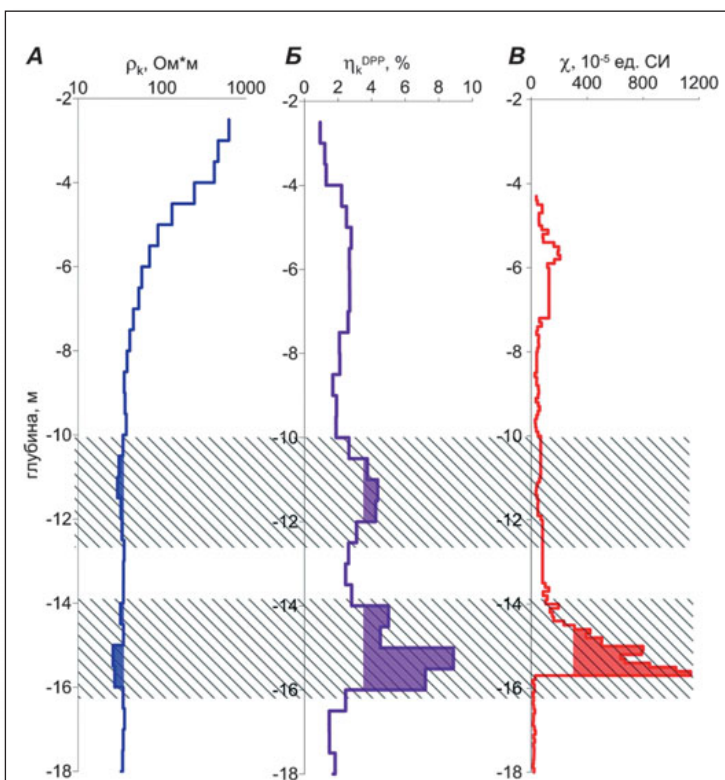
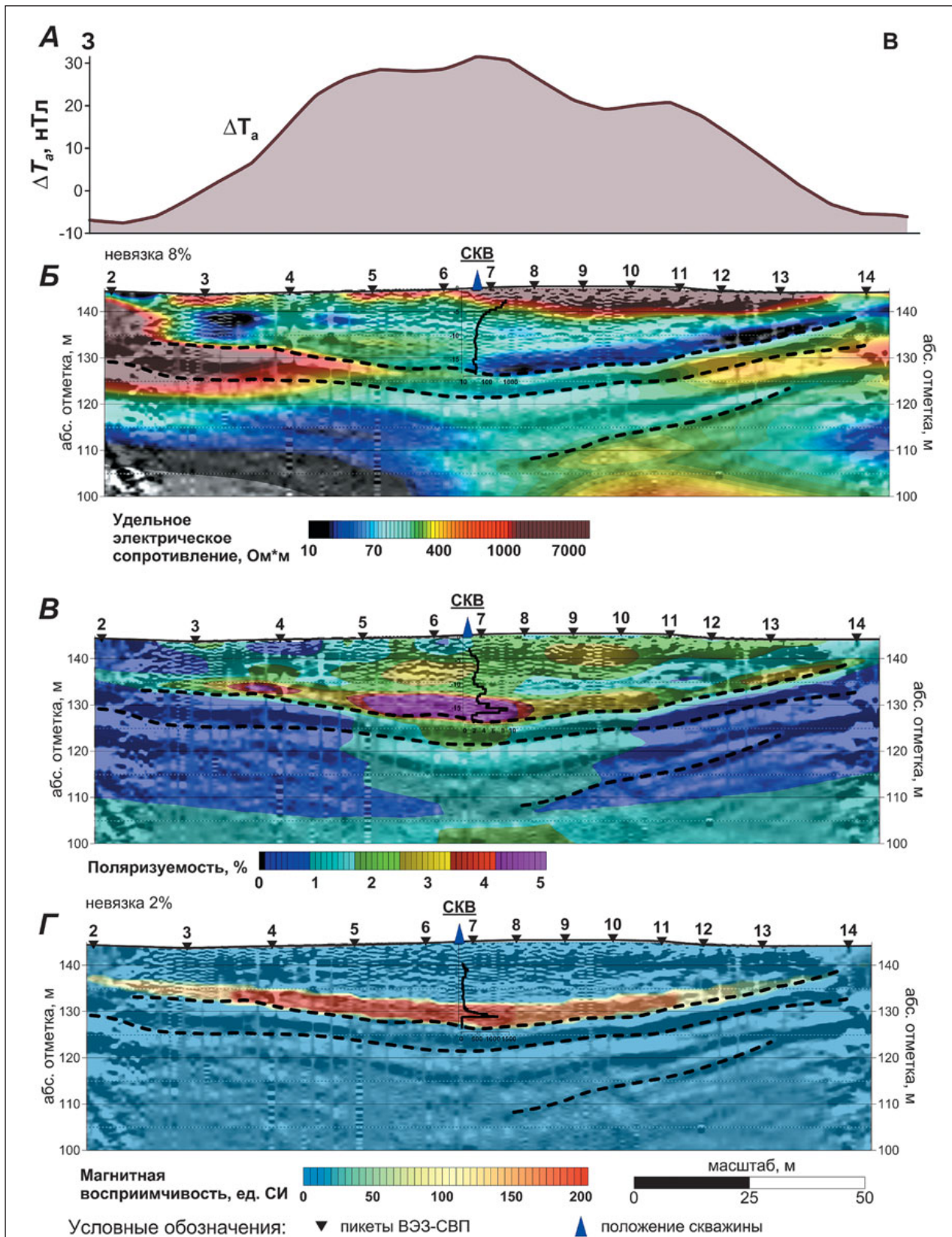


Рис. 6. Графики: а — кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ) по данным скважинных измерений; б — кажущейся поляризуемости ( $\eta_k^{\text{DPP}}$ ) на частоте 19 Гц по данным скважинных измерений; в — магнитной восприимчивости ( $\chi$ ) по результатам капнометрии керна

томографии желателно предварительно фильтровать от эффектов, связанных с приповерхностными неоднородностями вблизи питающих и приемных электродов. В данной работе при проведении совместной

инверсии данных электроразведки и сейсморазведки был использован оригинальный метод двухэтажной фильтрации для подавления влияния приповерхностных неоднородностей [2].



• Рис. 7. Результаты геофизических исследований по профилю № 1: а — график аномального приращения полного вектора магнитного поля,  $\Delta T_a$ ; б — модель удельного электрического сопротивления; в — поляризационная модель для частоты 19 Гц; г — магнитная модель по результатам решения двумерной обратной задачи. На разрезах построены графики кажущегося сопротивления, кажущейся поляризуемости и магнитной восприимчивости



Итогом совместной инверсии сейсморазведочных и электроразведочных данных явилась двумерная модель удельных сопротивлений и скоростей распространения продольных волн с общими границами слоев, приведенная на рис. 8. Полученная модель несколько отличается от последовательной интерпретации данных электроразведки и магниторазведки, выполненной на основе модели МОВ-ОГТ (см. рис. 7, б). Но есть в полученных моделях и общие черты. На восточном фланге профиля, в приповерхностной части разреза присутствует линза сухого песка, характеризующегося самыми высокими значениями удельного электрического сопротивления (более 5000 Ом·м) и самыми низкими скоростями продольных волн (менее 300 м/с). В центральной части профиля, на глубинах 12–15 м существует тонкий слой хорошо проводящих глин (сопротивление глин 10–25 Ом·м), характеризующихся промежуточными значениями скоростей  $V_p = 1300–1700$  м/с. В основании модели залегают породы с сопротивлением 100–200 Ом·м и скоростями  $V_p = 2000–2200$  м/с, что характерно для обводненных песчано-глинистых или

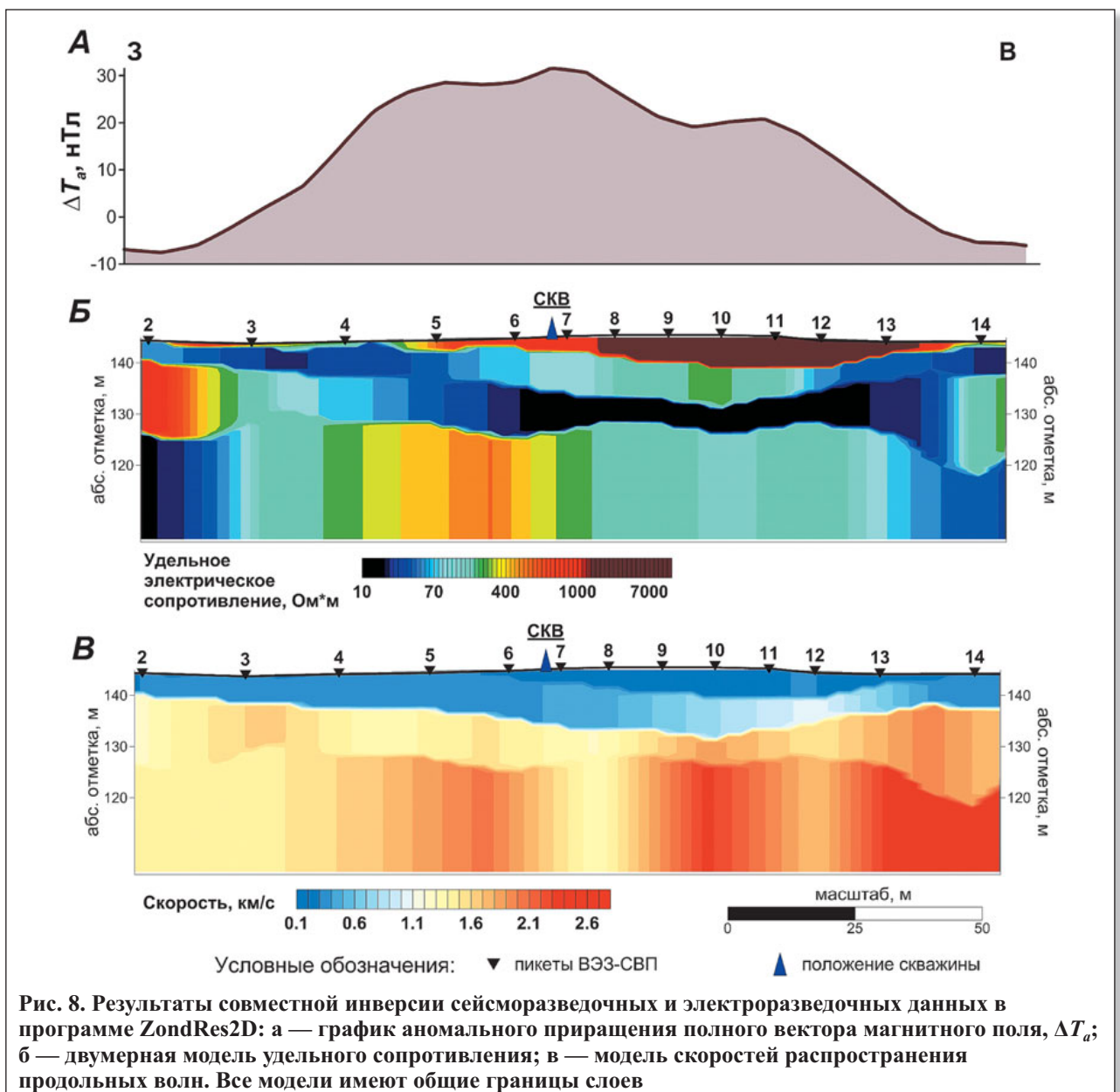
карбонатных отложений. На участке между точками ВЭЗ № 4 и 7 в нижнем горизонте выделяется высокоомный блок с повышенными значениями  $V_p$ . По нашим предыдущим результатам на этом участке фиксируется яркая граница между блоком более проводящих пород на западе и высокоомных на востоке профиля (см. рис. 7, б).

### Геолого-геофизическая модель объекта «Мокрово»

На основании результатов интерпретации наземных геофизических работ, измерений в скважине и на керне была составлена принципиальная геолого-геофизическая модель (рис. 9) строения верхней части разреза в районе аномалии «Мокрово» по профилю № 1.

Основные черты полученной модели следующие.

Исзуемая структура представляет собой впадину с максимальными глубинами около 20 м, заполненную глинами и суглинками четвертичного возраста. Предположительно породы накапливались в слабопроточном бассейне большой глубины (озеро или речная ста-



рица) с большим содержанием органики. Вся толща глин-суглинков по результатам рентгенофлуоресцентного анализа керн характеризуется высокими содержаниями железа (4–5%). Большое содержание железа может быть связано с накоплением продуктов выветривания на поверхности известняков, являющихся вмещающими породами для отложений палеодолины.

Положительная магнитная аномалия связана с самым нижним, небольшим по мощности (2–4 м) горизонтом этой толщи, который представлен черными глинами с включениями магнитных соединений железа. В силу слабопроницаемой структуры глин доступ кислорода к подошвенной части палеодолины был заблокирован, здесь происходили процессы диагенеза, при которых процесс окисления органического вещества привел к возникновению восстановительных условий в глинистых породах. При переходе железа из трех- в двухвалентное состояние растворимость и подвижность этого элемента возросли. Перемещаясь в горных породах, ионы двухвалентного железа вступали в реакцию с ионами серы, поступавшими за счет разложения органического растительного вещества. В результате образовывались сульфидные соединения железа.

Процессы соединения железа с серой достаточно молодые и имеют возраст около 5–8 тысяч лет. На начальном этапе эти соединения образуются в виде микроглобулей (микросфер) размером в сотые доли миллиметра. Структура микросфер аморфная, но они обладают высокими значениями намагниченности. В приповерхностной части разреза, где есть доступ кислорода, соединения железа окисляются и теряют свои магнитные свойства. Нижний интервал глин характеризуется также высокими значениями поляризуемости, особенно в центре профиля, и низкими значениями УЭС в восточном борту мульды.

По результатам многочастотной инверсии данных ВЭЗ-СВП была получена модель временного параметра поляризуемости ( $\tau$ ). Аномальный слой глин характеризуется очень малыми значениями временного параметра 10–30 мс. Быстрый спад вызванной поляризации связан в первую очередь с микроскопическими размерами поляризующихся минералов.

В приповерхностной части разреза выявлены отдельные линзы флювиогляциальных песков, которые выделяются на глубинных разрезах высокими значениями УЭС и низкими скоростями продольных волн.

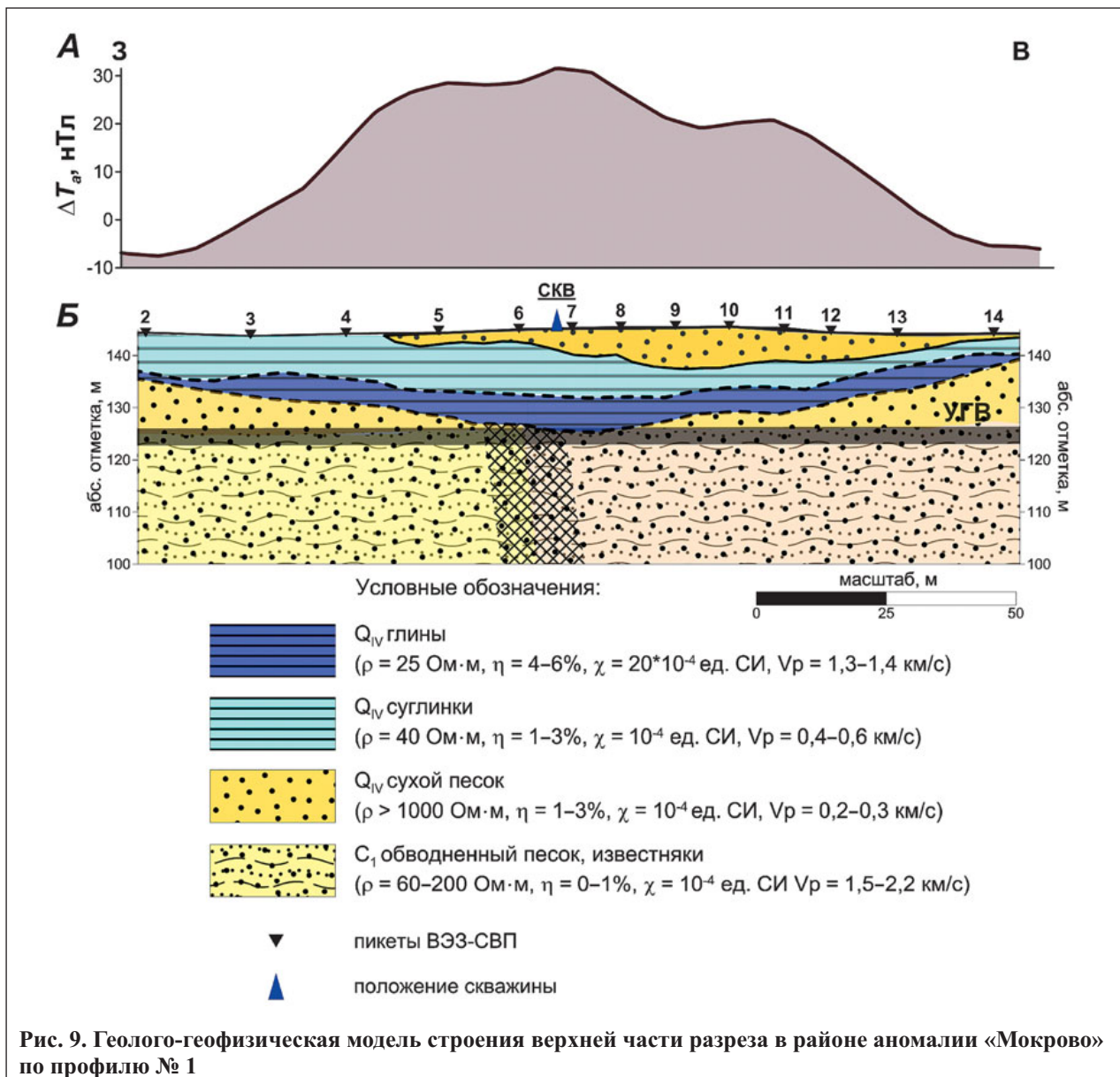


Рис. 9. Геолого-геофизическая модель строения верхней части разреза в районе аномалии «Мокрово» по профилю № 1

Глинистая толща подстилается терригенно-карбонатными породами нижнего карбона. Подошва глин является наиболее яркой границей на разрезе МОВ-ОГТ. На этой границе происходит резкое увеличение скоростей продольных волн. Уровень грунтовых вод предположительно находится на абсолютных отметках 125–126 м. Ниже этой границы уменьшается уровень удельных сопротивлений и увеличиваются скорости сейсмических волн (см. рис. 4, в, 7, б).

Ниже абсолютной отметки 125 м в центральной части профиля наблюдается смена электрических свойств пород. Западная часть модели характеризуется значительно более низкими сопротивлениями (15–40 Ом·м), чем восточная (150–250 Ом·м). Эта субвертикальная зона выделяется также повышенными значениями поляризуемости (см. рис. 7, в). По резкой смене характера разреза можно предположить здесь наличие зоны повышенной проницаемости в карбонатных отложениях, которая могла способствовать привнесу закисного железа, ионов серы или соединений серы с железом в подошвенные участки долины.

Ранее на рассматриваемом участке проводились работы методом зондирования становлением поля (ЗСБ) с аппаратурой TEM-FAST и наземные гравиметрические измерения с аппаратурой SINTREX. Измерения проводились по субширотному профилю, расположенному несколько севернее профиля № 1. Результаты этих работ представлены в виде графиков локальной составляющей поля силы тяжести, аномального магнитного поля (рис. 10, а) и в виде глубинной геоэлектрической модели, полученной по результатам одномерной инверсии данных ЗСБ (рис. 10, б). Масштаб съемки был более мелкий, что не позволяет сопоставлять детали полученных геоэлектрических разрезов. Тем не менее мы видим, что максимум магнитной аномалии сопровождается ступенью в поле силы тяжести амплитудой 0,8 мГал и в этом же месте происходит резкая смена характера геоэлектрического разреза, которую мы по результатам предыдущих работ интерпретировали как зону тектонического нарушения.

## Выводы

В представленной работе рассмотрены результаты комплексных геофизических исследований, выполненных в ходе проведения учебно-научных практик со студентами-геофизиками геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на локальной магнитной аномалии «Мокрово» в Юхновском районе Калужской области. Эти работы являются продолжением наших исследований слабоконтрастных магнитных аномалий, связанных с четвертичными отложениями в районе геофизического полигона «Александровка» [3].

Результаты совместной интерпретации данных электроразведки, сейсморазведки и магниторазведки показали, что аномалия магнитного поля связана с горизонтом глин, предположительно четвертичного возраста, залегающим на глубине 11–15 м в основании небольшой отрицательной структуры, заполненной тонкодисперсными терригенными отложениями. Этот же горизонт обладает высокой электрической поляризуемостью и несколько пониженными значениями удельного электрического сопротивления. Глины содержат включения магнитных соединений железа, находящихся в аморфном состоянии. Микроскопический размер электропроводящих включений обеспечивает высокочастотный характер вызванной поляризации. Таким образом, мы можем использовать результаты интерпретации метода ВП для определения положения магнитоактивного слоя пород, суще-

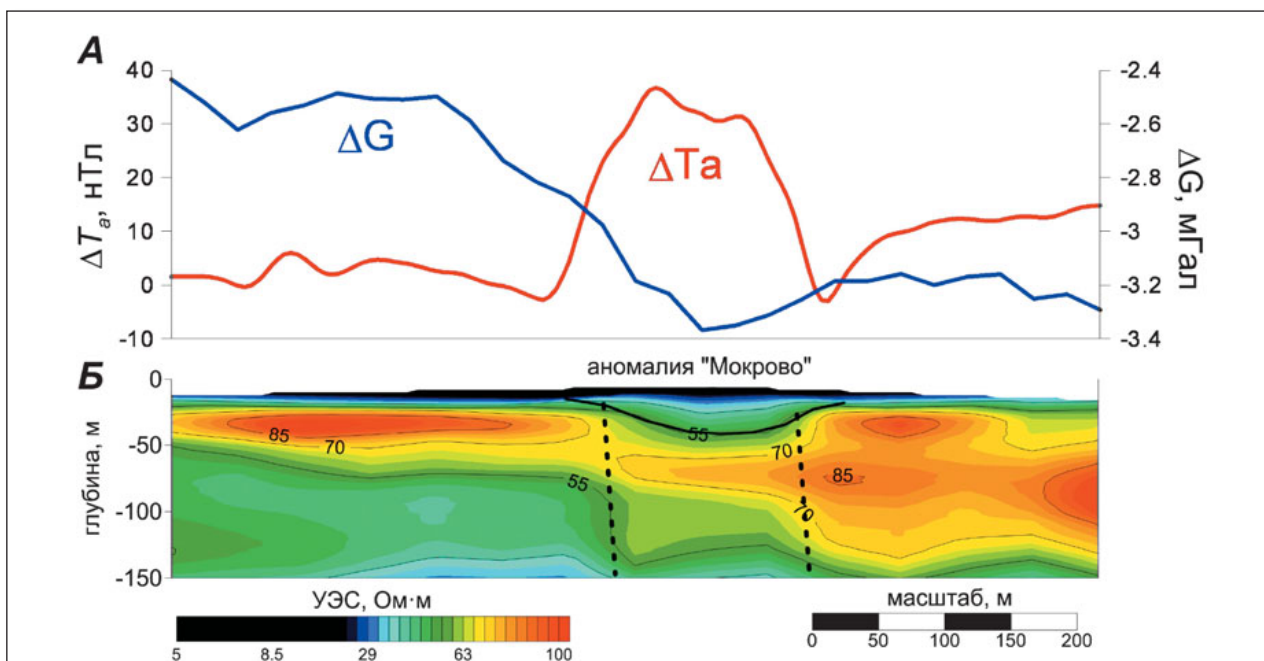



Рис. 10. Результаты геофизических работ 2007 г. в районе аномалии «Мокрово»: а — графики аномального приращения полного вектора магнитного поля  $\Delta T_a$  и локальной составляющей гравитационного поля; б — геоэлектрическая модель до глубины 150 м по результатам одномерной интерпретации данных метода ЗСБ. Пунктиром выделена зона, отождествляемая с тектоническим нарушением, по результатам работ прошлых лет

ственно ограничив неоднозначность решения обратной задачи магниторазведки.

В центре выделенной структуры на больших глубинах фиксируется субвертикальная зона, по которой происходит резкое изменение электрических свойств. Это может свидетельствовать о наличии в данном месте тектонического нарушения, зоны повышенной проницаемости горных пород. Данную гипотезу подтверждают результаты давних работ методом ЗСБ и график локальной составляющей поля  $\Delta G$ , на котором в этом месте наблюдается «ступень».

Важным результатам работы является успешное применение нового алгоритма совместной инверсии

данных МПВ и ВЭЗ, реализованного А.Е. Каминским в программе ZondRes2D. Полученная при использовании этого алгоритма единая модель сопротивлений и скоростей поперечных волн в общих чертах совпадает с моделью, полученной нами по результатам последовательной интерпретации электроразведочных данных на основе глубинной модели МОВ-ОГТ. Внедрение алгоритма совместной инверсии поможет в дальнейшем существенно сократить время, которое затрачивает интерпретатор для построения единой геолого-геофизической модели, удовлетворяющей и электроразведочным, и сейсморазведочным данным. 

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н. и др. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 14–17.
2. Каминский А.Е., Лухманов В.Л. Новые подходы к интерпретации геофизических материалов // Тезисы докладов 8-й Международной научно-практической конференции по инженерной геофизике EAGE «Инженерная геофизика-2012». Геленджик, Россия, 2012 г.
3. Куликов В.А., Амбросимова М.И., Бобачев А.А. и др. Строение погребенной долины в урочище Борисенки (Южновский район, Калужская область) по результатам комплексных геофизических работ // Инженерные изыскания. 2015. № 4. С. 42–55.
4. Куликов В.А., Груздева И.Д., Яковлев А.Г. Результаты работ методом ВЭЗ-ВП в районе полигона «Александровка» Калужской области // Вестник Московского университета. Сер. Геология. 2013. № 3. С. 53–61.
5. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М.: Недра, 1978. 157 с.
6. Куликов В.А., Яковлев А.Г. Применение новой аппаратуры производства ООО «Северо-Запад» при гидрогеологических и инженерных электроразведочных работах // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 8–10.
7. Piip V.B. 2D inversion of refraction travelttime curves using homogeneous functions // Geophysical Prospecting. 2001. V. 49. P. 461–482.
8. Skvortsov A.G., Hunter J.A., Goriainov N.N. High-Resolution Shear-Wave Reflection Technique for permafrost engineering applications. New results from Siberia // 62nd International SEG Meeting. New Orlean, USA. 1992. P. 382–383.

Журнал «Инженерные изыскания» —  
лучшая площадка для вашей рекламы!



www.geomark.ru

Реклама