УДК 550.8.056, 550.837

РЕЗУЛЬТАТ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДАННЫХ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ И АЭРОМАГНИТОРАЗВЕДКИ ПРИ ПОИСКАХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ЮГЕ ЯКУТИИ

А.Ю.ДАВЫДЕНКО[1], Н.А.АЙКАШЕВА[2], С.В.БУХАЛОВ[2], Ю.А.ДАВЫДЕНКО[2]
[1] *Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*
[2] *Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

На юге Якутии в 2014 г. в рамках поисковых работ на подземные воды выполнена апробация комплекса геофизических методов: аэромагниторазведки и электроразведочных работ методами зондирования становлением поля в ближней зоне и электромагнитного зондирования и вызванной поляризации. Перспективными структурами для бурения гидрогеологических скважин являются зоны разрывных тектонических нарушений. Для их выделения использованы данные аэромагниторазведки и электроразведки. Результаты бурения подтвердили наличие обводненных зон, однако анализ полученной информации позволил сделать вывод о том, что водообильность разломов напрямую не связана с электропроводимостью.

***Ключевые слова*:** электромагнитное зондирование, вызванная поляризация, переходные процессы, аэромагниторазведка, магнитная восприимчивость, подземные воды

***Как цитировать эту статью*:** Результат комплексирования данных импульсной электроразведки и аэромагниторазведки при поисках подземных вод на юге Якутии / А.Ю.Давыденко, Н.А.Айкашева, С.В.Бухалов, Ю.А.Давыденко // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 156-162. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.156

Для развития промышленности Восточной Сибири и освоения нефтегазовых месторождений региона актуальной задачей является выполнение поисково-разведочных работ на подземные воды для питьевого и технического водоснабжения.

Поисково-оценочные работы выполнялись в 2014-2015 годах на территории Ленского района Республики Саха (Якутия) в юго-восточной части Среднесибирского плоскогорья. Результаты геофизических исследований в комплексе с геолого-гидрогеологическими данными использовались для проектирования оптимального расположения гидрогеологических скважин.

По геолого-гидрогеологическим условиям рассматриваемая территория относится к третьей группе сложности, что связано с распространением здесь многолетней мерзлоты, структурно-геологическим строением и трапповым магматизмом триасового периода. Ресурсы подземных вод концентрируются на участках недр, приуроченных к таликовым зонам, которые распространены по площади исследований без видимой закономерности, однако в основном тяготеют к зонам тектонических нарушений, а также к контактам терригенных пород и интрузивных траповых образований [7].

В качестве основы для структурно-тектонического картирования территории были использованы результаты дешифрирования космоснимков, данные аэровизуальных наблюдений и аэромагниторазведки. При заложении скважин учитывались результаты интерпретации профильных работ методом малоглубинного зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и детальной площадной съемки методом электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП), выполненных на трех участках.

Для выявления зон развития траппового магматизма и картирования тектонических нарушений были использованы данные аэромагнитной съемки, проведенной в 2006-2008 годах ЗАО ГНПП «Аэрогеофизика» с расстоянием между маршрутами около 500 м при высоте полета 640-660 м над рельефом, средняя высота которого составляет около 390 м.

Интерпретация аэромагнитных данных выполнялась с использованием программного комплекса GelioSMI [6] и включала следующие этапы:

1. Вычисление аномальной составляющей магнитного поля T_a путем применения робастной фильтрации [4] для подавления высокочастотных помех и устранения эффекта «затяжек» (leveling) в сочетании с фильтрацией методом главных компонент [9].

2. Расчет локальной составляющей магнитного поля T_B, которая отражает развитие разрывной тектоники и траппового магматизма в осадочном чехле. Локальная составляющая T_B была найдена исключением из поля T_a составляющей T_R, обусловленной более глубоко залегающими неоднородностями осадочного чехла и кристаллического фундамента. Эта задача решена трехмерной линейной инверсией магнитного поля T_a с определением составляющих вектора суммарной

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.156

намагниченности для параллелепипедов с размерами в горизонтальной плоскости 4000 × 4000 м, заполняющих пространство на глубину тремя слоями: 0-2000; 2000-5000 и 5000-9500 м. При этом за составляющую магнитного поля T_R был принят эффект магнитных неоднородностей в диапазоне глубин 2000-5000 и 5000-9500 м. В реализованной технологии инверсии использован подход к решению некорректных обратных задач большой размерности [13] и определение по точке перелома L-кривой, отражающей зависимость нормы определяемых параметров модели от нормы невязки поля [10]. Несмотря на значительный горизонтальный размер ячеек, выбранный для получения устойчивого решения, среднеквадратическая невязка модельного поля с наблюденным составила 8,6 нТл.

3. Подавление эффектов магнитных неоднородностей фундамента и нижней части осадочного чехла в локальной составляющей $T_B = T_a - T_R$, влияние которых из-за значительных горизонтальных размеров ячеек не было полностью скомпенсировано. С этой целью была использована фильтрация методом главных компонент, а также направленная фильтрация в сочетании с робастной многомерной регрессией. В результате получена локальная составляющая T_L, которая весьма контрастно отражает магнитные неоднородности в верхней части осадочного чехла, в том числе линейные аномалии, связанные с дизъюнктивной тектоникой.

4. Рассчитано поле робастного стандартного отклонения T_D по полю локальной составляющей T_L, для которого характерна повышенная изрезанность в областях распространения траппов. Для определения этой характеристики в скользящих

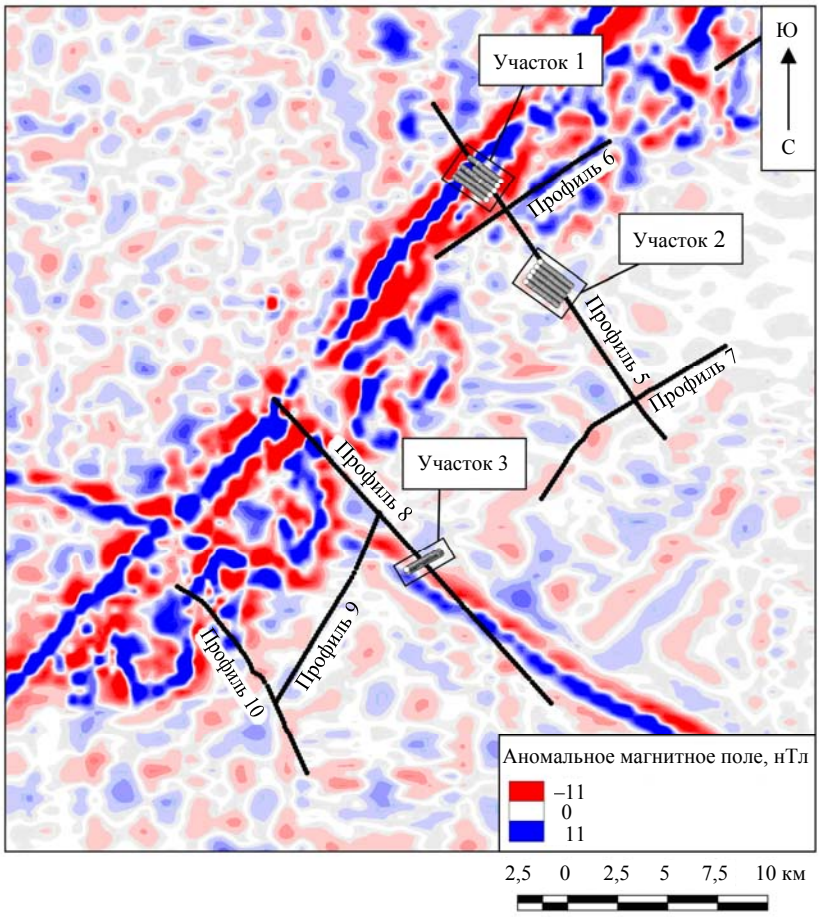


Рис.1. Схема построения профилей импульсной электроразведки на карте локальной составляющей магнитного поля T_L

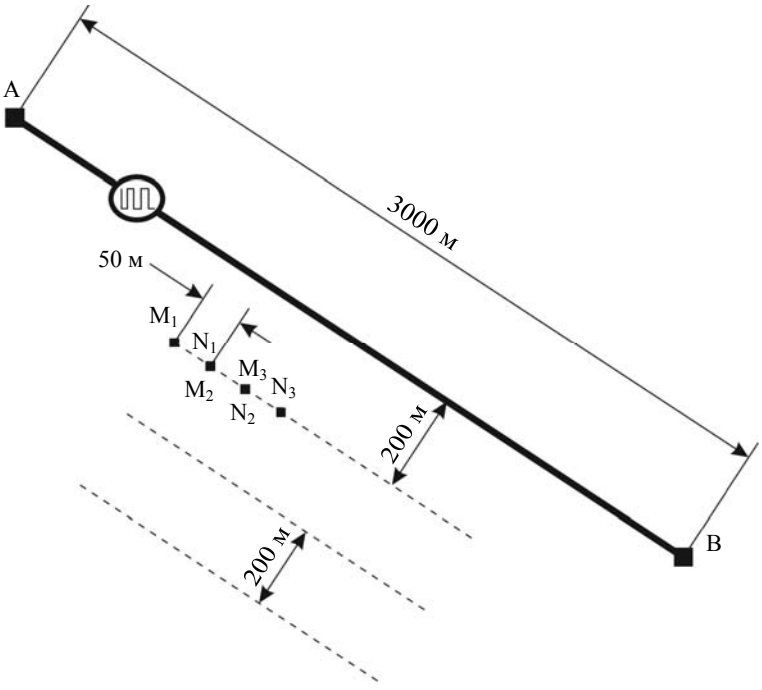


Рис.2. Схема выполнения площадных работ методом ЭМЗ-ВП

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.156

окнах различного размера (от 2000 × 2000 до 5000 × 5000 м) был проведен расчет медианного абсолютного отклонения (MAD) – характеристики, устойчивой к аномальным выбросам поля. Полученное для окон различных размеров множество реализаций MAD было сжато в поле первой главной компоненты с последующим обратным преобразованием его в T_D. Одна из зон повышенной дисперсии локальной составляющей магнитного поля находится в пределах лицензионного участка. Эта зона приурочена к разлому северо-восточного простирания и характеризует область распространения продуктов траппового магматизма.

С целью изучения геоэлектрической структуры верхней части разреза и выделения в разрезе водоносных горизонтов были проведены электроразведочные работы методом малоглубинного ЗСБ, результаты которых были переобработаны в программном комплексе «Mars1D» [5] и проинтерпретированы с учетом данных аэромагниторазведки. Фрагмент сети профилей показан на рис.1 (профили 5-10 – съемка методом малоглубинного ЗСБ, участки 1-3 – площадная съемка методом ЭМЗ-ВП [2]). Подбор кривых осуществлялся для соосной и разнесенной петли одновременно, в результате чего с большей достоверностью удалось определить зоны развития многолетнемерзлых пород (ММП) за счет использования эффекта индукционно-вызванной поляризации [3, 11].

Для уточнения мощности водоносных горизонтов и границ пластов в районах проектируемых скважин на трех участках были проведены площадные работы с установкой срединного градиента методом ЭМЗ-ВП (рис.2). Этот метод позволяет наиболее полно использовать информацию из переходных процессов, возбуждаемых прямоугольными разнополярными импульсами заземленного источника тока и регистрируемых многоэлектродной заземленной приемной линией [1]. Способ измерения и обработка данных переходных процессов, сочетающая робастный регрессионный анализ с инверсией в рамках модели поляризующейся среды, позволяют определять не только кажущееся, но и частотно-зависимое удельное электрическое сопротивление (УЭС) модели. Особенностью метода является система регистрации обработки с минимальными искажениями индукционного эффекта, считающегося помехой для традиционных методов ВП. Использованный подход к регистрации переходных процессов накладывает новые условия на систему сбора данных. Для корректной записи используется аналого-цифровой преобразователь с высокой частотой дискретизации (не менее 100 кГц) и соответствующая обработка первичных данных.

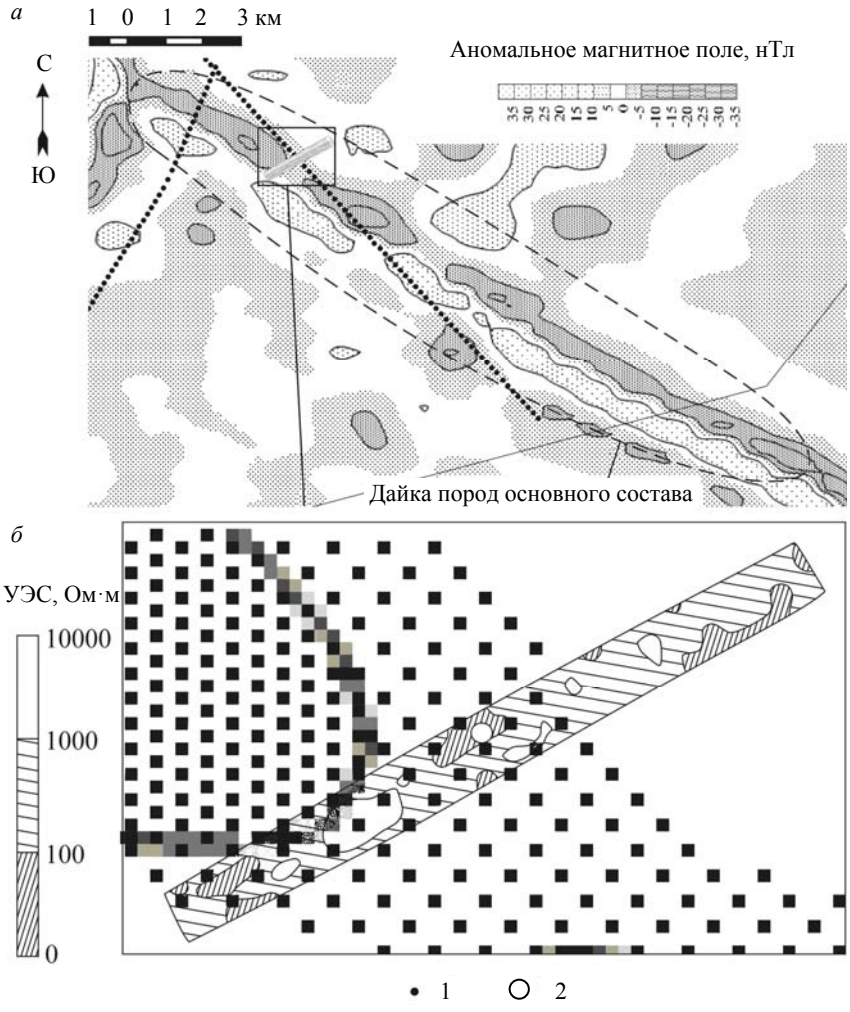


Рис.3. Схема локальной составляющей поля T_L аэромагниторазведки (*а*) и увеличенный фрагмент с участком работ 3 методом ЭМЗ-ВП в районе гидрогеологической скважины (*б*)

1 – пикеты ЗБС; 2 – гидрогеологическая скважина

При создании опорной геоэлектрической модели для обоих методов импульсной электроразведки (ЗСБ и ЭМЗ-ВП)

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.156

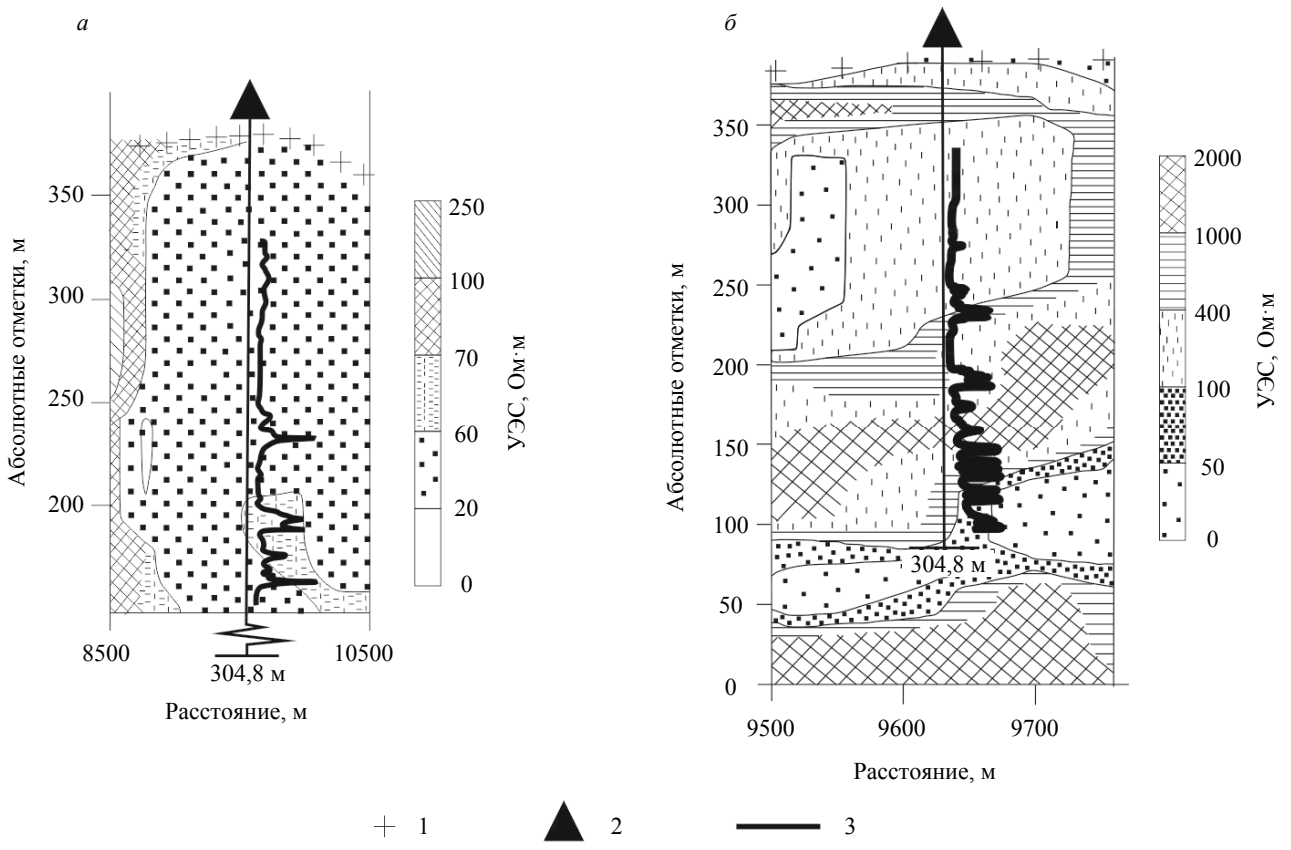


Рис.4. Сопоставление данных каротажа сопротивлений и геоэлектрических разрезов: *а* – по линии профиля 8 ЗСБ; *б* – по линии профиля 13 ЭМЗ-ВП

1 – пикеты; 2 – гидрогеологическая скважина; 3 – кривая КС

использовались результаты каротажа скважин глубокого бурения. Подбор осуществлялся в рамках одномерной поляризующейся горизонтально-слоистой модели. Для учета частотной дисперсии применяли зависимость Cole-Cole [8], что позволило определить поляризационные характеристики разреза:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[1 - \frac{\eta (i\omega\tau)^c}{1 + (i\omega\tau)^c} \right],$$

где ρ – УЭС; ω – частота; ρ_0 – УЭС на постоянном токе; η – коэффициент поляризуемости; i – мнимая единица; τ – время релаксации; c – показатель степени.

При решении обратной задачи использован набор алгоритмов минимизации: метод Нелдера – Мида, также известный как метод деформируемого многогранника, Симплекс-метод [14], алгоритм Левенберга – Марквардта [12] и метод главных осей (PrAxis), что для корректно выбранной модели позволяет устойчиво и с высокой скоростью подбора находить положение глобального минимума в многомерном признаковом пространстве. Уточнение результатов проводилось вторичным подбором кривых после закрепления некоторых параметров модели на основе априорной геолого-геофизической информации. С целью подавления профильных аномалий и повышения качества сходимости на «крестах» профилей использовался оригинальный подход; кривые осреднялись в эллипсе с заданными осями. При осреднении использовалась робастная процедура, при этом вес кривой в центре эллипса задавался выше, чем вес соседних кривых.

В результате интерпретации данных ЗСБ и ЭМЗ-ВП на разрезах УЭС были выделены геоэлектрические горизонты, а на разрезах поляризуемости – зоны развития ММП. Для зон ММП характерны значения УЭС = 500÷800 Ом·м, поляризуемости – до 40 %, время релаксации около $1 \cdot 10^{-5}$ с и показатель степени $c = 0{,}9$. Траппы характеризуются аналогичными значениями поляризуемости, но большим временем релаксации ($\tau \approx 1 \cdot 10^{-3}$ с) и высоким сопротивлением (около

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.156

2000 Ом·м). Водоносные горизонты имеют низкое сопротивление (как правило, ниже 50 Ом·м) и контрастно выделяются на фоне вмещающих пород с более высоким сопротивлением (от 200 Ом·м и выше). Перспективными на наличие водопритока являются дизъюнктивные тектонические нарушения, которые на геоэлектрических разрезах выглядят как субвертикальная низкоомная область, коррелирующая с разломами, выделяемыми в результате анализа локальной составляющей магнитного поля.

Перспективная область с пониженными значениями УЭС была обнаружена на одном из профилей ЗСБ, пересекающем под острым углом дайку пород основного состава, выделенную по данным магниторазведки (рис.3, *а*). Вкрест профилю ЗСБ и дайке был задан участок 3 площадной съемки ЭМЗ-ВП, в центре которого была пробурена гидрогеологическая скважина (рис.3, *б*). При сопоставлении геоэлектрического разреза по профилям ЗСБ (рис.4, *а*) и ЭМЗ-ВП (рис.4, *б*) с данными каротажа сопротивлений (КС) выявлена высокая корреляция с верхними низкоомными горизонтами. Разрез по скважине представлен суглинками, подстилаемыми аргиллитами, известняками и доломитами. На глубине 310-358 м наблюдался водоприток из кавернозного горизонта, соответствующего области повышенной проводимости на геоэлектрическом разрезе.

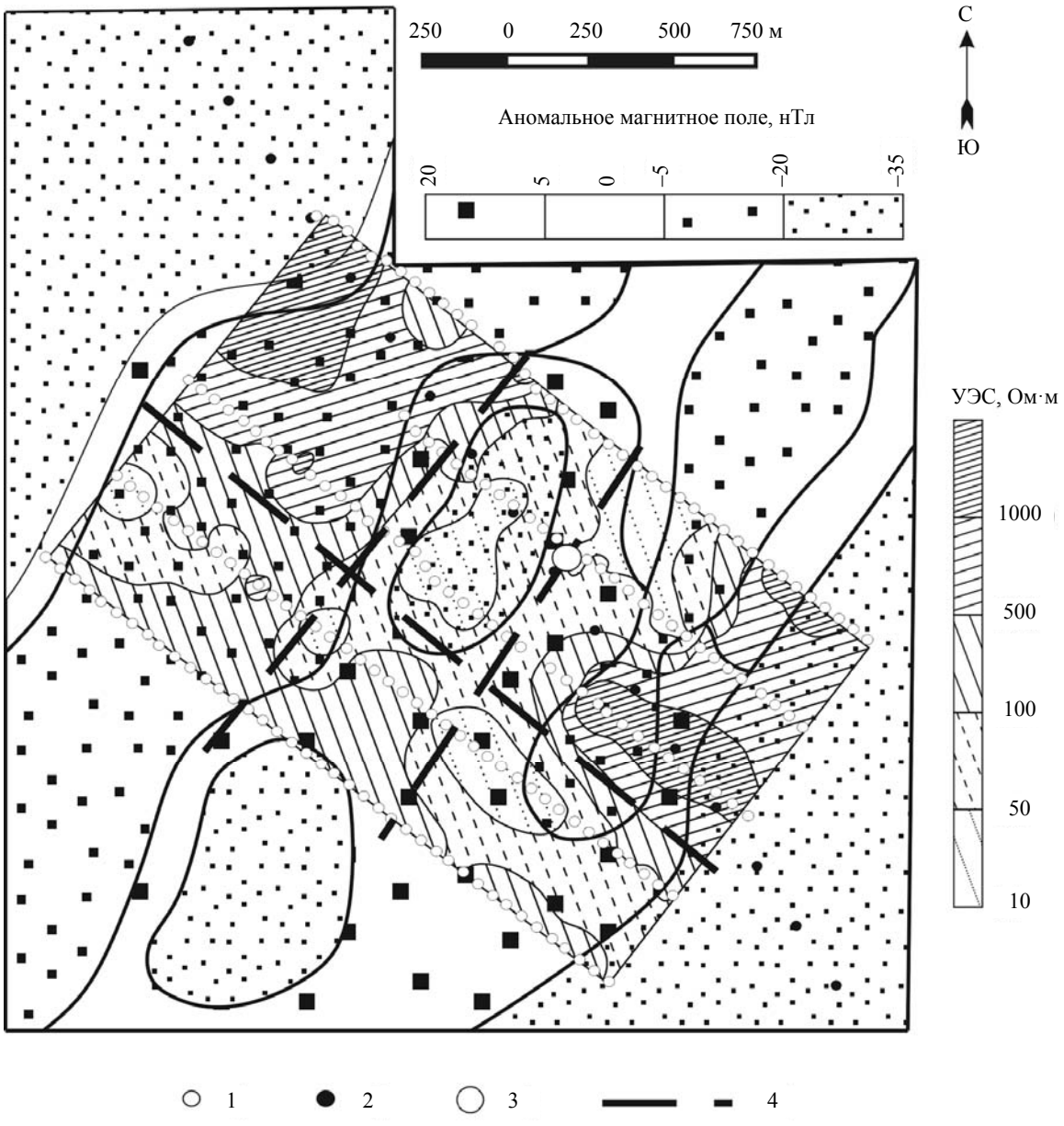


Рис.5. Схема локальной составляющей поля T_L аэромагниторазведки и УЭС на участке 1 в районе гидрогеологической скважины

1 – пикеты ЭМЗ-ВП; 2 – пикеты ЗСБ; 3 – гидрогеологическая скважина; 4 – линии разломов

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.156

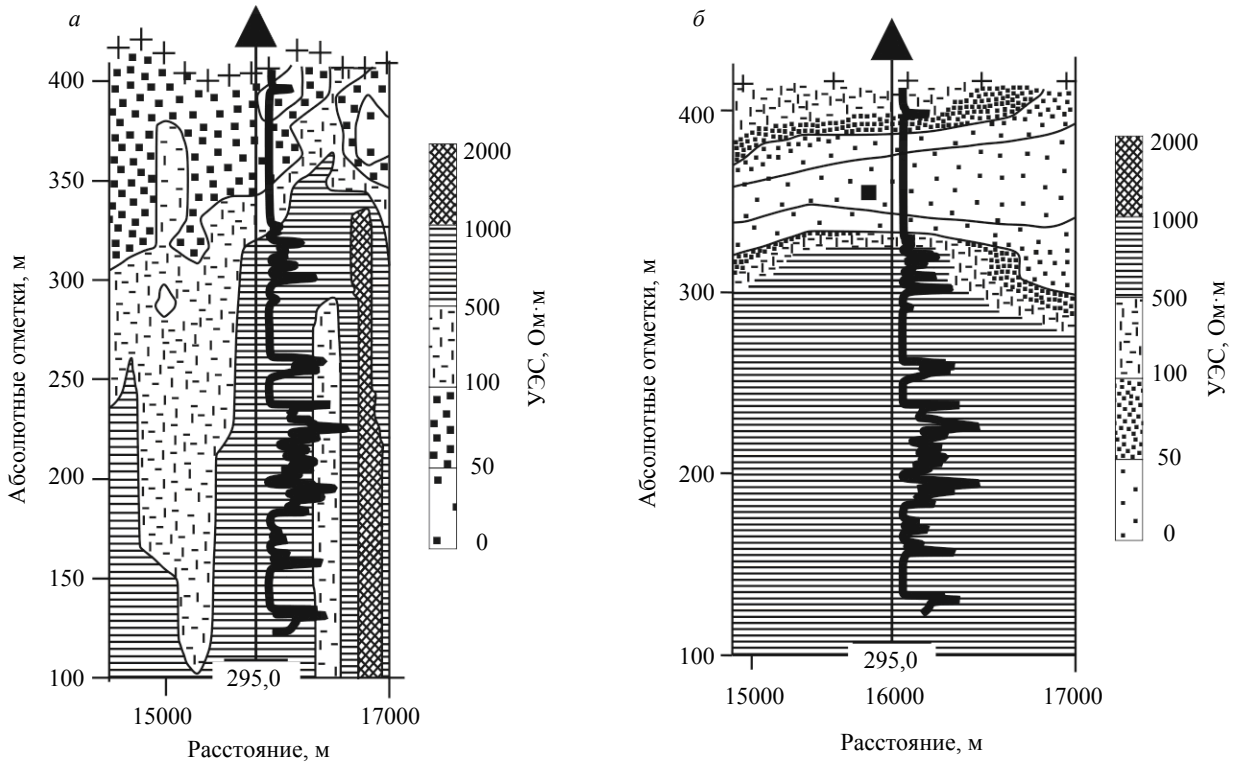


Рис.6. Сопоставление данных каротажа сопротивлений и геоэлектрических разрезов: *а* – на профиле 5 (МПП); *б* – на профиле 4 (ЭМЗ-ВП)

Усл. обозначения см. рис.4

Другой участок площадной съемки ЭМЗ-ВП под номером 1 находится в пределах ядра антиклинальной структуры (рис.5). Судя по интенсивности локальных аномалий магнитного поля, выделенных в результате обработки данных магниторазведки, и высоким значениям УЭС, полученным по инверсии данных ЗСБ (рис.6, *а*) на этом участке присутствуют трапповые интрузии. Задача для площадных работ ЭМЗ-ВП заключалась в локализации обводненной зоны повышенной трещиноватости в пределах трапповой интрузии. Выделенный по результатам инверсии ЭМЗ-ВП на глубине 50 м низкоомный горизонт коррелируется с изменениями магнитного поля, что позволяет уточнить положение разломов (рис.6, *б*). В результате в одной из выделенных разломных зон была задана гидрогеологическая скважина, в которой предполагалось отсутствие ММП и наличие трещинно-жильных подземных вод на глубинах до 300 м. Пробуренная скважина также дала хорошие притоки и подтвердила наличие в долеритах трещиноватой обводненной зоны. Положение низкоомного горизонта в верхней части разреза с высокой точностью подтверждается данными каротажа сопротивлений. Еще один выделенный по данным ЭМЗ-ВП низкоомный обводненный горизонт находится глубже 400 м, а значит, прогнозируемые притоки возможны только с верхних водоносных горизонтов.

Выводы

Комплексирование данных дистанционного зондирования, аэромагниторазведки и электромагнитных зондирований позволило на начальных этапах выделить зоны тектонических нарушений, оконтурить тела трапповых интрузий, оценить особенности развития ММП на площади исследований. Сопоставление результатов опытно-фильтрационных работ с данными каротажа сопротивлений и результатами инверсии электромагнитных зондирований не позволило проследить устойчивую зависимость между электрической проводимостью горных пород и их водообильностью. По-видимому, это связано с тем, что даже небольшой объем подземных вод повышенной минерализации существенно меняет общее удельное электрическое сопротивление

пласта. Тем не менее, использование геофизических методов на стадии поисково-разведочных работ приводит к существенному повышению общей эффективности исследований за счет уточнения структурно-тектонических и геокриологических условий и, как следствие, позволяет экономить значительный объем средств на бурение разведочных скважин.

Благодарности. *Мы признательны коллегам гидрогеологам и геологам Л.И.Аузиной, В.В.Шульга, А.М.Усмановой, Г.С.Лоншакову; сотрудникам лаборатории «Геологической информатики» А.В.Паршину, С.А.Шестакову, А.В.Блинову, А.В.Костереву, С.Н.Просекину и сотрудникам лаборатории «Комплексирования геофизических методов» К.Ю.Ткачевой, М.С.Шкиря, В.А.Белову, А.С.Башкееву за плодотворное обсуждение результатов на различных стадиях исследования, а также студентам группы ТГ-12 ИРНИТУ Д.Е.Дворянскому и А.А.Субботину, выполнявшим полевые работы.*

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № 13.7232.2017/БЧ в рамках государственного задания Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Давыденко Ю.А.* Перспективы использования индукционной составляющей переходного процесса в традиционных методах постоянного тока / Ю.А.Давыденко, П.А.Попков, А.В.Новопашина // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 4. С. 73-84.

2. Патент 2574861 РФ. МПК G01V3/08. Способ измерения и обработки переходных процессов с заземленной линией при импульсном возбуждении поля электрическим диполем с целью построения геоэлектрических разрезов и устройство для осуществления этого способа с помощью аппаратно-программного электроразведочного комплекса (АПЭК «МАРС») / Ю.А.Давыденко, А.Ю.Давыденко, И.Ю.Пестерев и др. Опубл. 10.02.2016.

3. Поиск таликов методом ЗСБ в условиях интенсивного проявления индукционно-вызванной поляризации / Н.О.Кожевников, Е.Ю.Антонов, А.К.Захаркин, М.А.Корсаков // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 12. С. 1815-1827.

4. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния / Ф.Хампель, Э.Рончетти, П.Рауссеу, В.Штаэль. М.: Мир, 1989. 512 с.

5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2012660743 РФ. Программа одномерной инверсии «Mars1D» / И.Ю.Пестерев. Опубл. 20.08.2016.

6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2012613705 РФ. Программный комплекс многомерного статистического анализа структуры геофизических полей GelioSMI / А.Ю.Давыденко, А.В.Грайвер. Опубл. 20.08.2016.

7. *Auzina L.I.* System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia / L.I.Auzina, A.V.Parshin // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 33 (2016). P. 1-6. doi: 10.1088/1755-1315/33/1/012060

8. *Cole K.S.* Dispersion and absorption in dielecrtrics / K.S.Cole, R.H.Cole // J. Chem. Phys. 1941. Vol. 6. P. 341-353.

9. *Davydenko A.Y.* Principal component analysis for filtering and leveling of geophysical data / A.Y.Davydenko, A.V.Grayver // Journal of Applied Geophysics. 2014. 109. P. 266-280.

10. *Hansen P.C.* Rank-deficient and discrete ill-posed problems: numerical aspects of linear inversion. Philadelphia: SIAM. 1998. 247 p.

11. *Kozhevnikov N.O.* Fast-decaying inductively induced polarization in frozen ground: a synthesis of results and models / N.O.Kozhevnikov, E.Yu.Antonov // Journal of Applied Geophysics. 2012. 82. P. 171-183.

12. *Levenberg K.* A Method for the Solution of Certain Problems in Last Squares // Quart. Appl. Math. 1944. Vol. 2. P. 164-168.

13. *Martin Cuma M.* Large-scale 3D inversion of potential field data / Martin Cuma M., G.A.Wilson, M.Zhdanov // Geophysical Prospecting. 2012. Vol.60. Iss. 6. P. 1186-1199.

14. *Nelder J.A.* A Simplex Method for Function Minimization / J.A.Nelder, R.Mead // Computer Journal. 1965. Vol 7. P. 308-313.

***Авторы*: А.Ю.Давыденко**, *д-р физ.-мат. наук, профессор, davydenkoay@gmail.com* (*Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*), **Н.А.Айкашева**, *младший научный сотрудник, aykasheva.na@gmail.com* (*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*), **С.В.Бухалов**, *аспирант, xerorodger@yandex.ru* (*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*), **Ю.А.Давыденко**, *канд. техн. наук, доцент, davidenkoya@gmail.com* (*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*).

Статья принята к публикации 28.11.2016.