

Оригинальная статья / Original article

УДК 550. 83

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164>

Интерпретация данных зондирования методом становления поля в ближней зоне с учетом индукционно-вызванной поляризации при площадных нефтегазопроисследовательских исследованиях на юге Сибирской платформы

© С.В. Компаниец^а, Н.О. Кожевников^б, Е.В. Мурзина^с, В.С. Емельянов^д

^{а,с}Иркутское электроразведочное предприятие, г. Иркутск, Россия

^бИнститут нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

^бНовосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

^сИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^дИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме: При изучении геологического разреза осадочного чехла Сибирской платформы метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) является основным электроразведочным методом, применяемым для решения нефтегазопроисследовательских задач в комплексе с сейсморазведкой. В последние годы при проведении работ стали массово регистрировать сигналы, осложненные влиянием индукционно-вызванной поляризации (ВПИ). Интерпретация таких сигналов в рамках горизонтально-слоистых проводящих моделей приводит к ошибочному определению удельного электрического сопротивления горизонтов осадочного чехла, расположенных в целевом интервале разреза. Данное исследование направлено на изучение переходных индукционных характеристик, осложненных влиянием ВПИ, зарегистрированных при проведении площадных работ, а также на разработку методических рекомендаций по интерпретации данных ЗСБ с учетом вызванной поляризации (ВП). Путем математического моделирования оценено влияние ВП на переходные характеристики, рассчитанные от модели, в которой поляризующийся горизонт расположен на различных глубинах. На основе результатов инверсии данных ЗСБ с учетом ВПИ по предложенной методике показана ее эффективность. Согласно результатам инверсии, проявления ВПИ связаны с породами верхней части разреза. Природа ВП связывается с присутствием пирита в отложениях юры и верхнего кембрия. Распределение удельного электрического сопротивления в целевых горизонтах, найденное с учетом ВП, приобретает логнормальный вид. Применение на этапе качественного анализа параметра, характеризующего расхождение ветвей кривых ЗСБ, позволяет районировать площадь по степени проявления ВПИ. При интерпретации данных ЗСБ с учетом ВПИ увеличивается точность инверсии данных и удается получить модели, согласующиеся с геологическим строением изучаемой территории, выполнить детальный прогноз коллекторских свойств подсолевых отложений.

Ключевые слова: метод зондирования становлением поля в ближней зоне, индукционно-вызванная поляризация, Сибирская платформа

Информация о статье: Дата поступления 29 марта 2019 г.; дата принятия к печати 30 апреля 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Мурзина Е.В., Емельянов В.С. Интерпретация данных зондирования становлением поля в ближней зоне с учетом индукционно-вызванной поляризации при площадных нефтегазопроисследовательских исследованиях на юге Сибирской платформы. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42. № 2. С. 151–164. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164.

Interpretation of near-field transient electromagnetic sounding data with the account of induction-induced polarization in areal exploration for oil and gas in the south of the Siberian craton

© Sofia V. Kompaniets^a, Nikolai O. Kozhevnikov^b,
Ekaterina V. Murzina^c, Vyacheslav S. Emelyanov^d

^{a,c}Irkutsk Electrical Prospecting Company, Irkutsk, Russia

^bInstitute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

^bNovosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

^cIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^dInstitute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The main electrical prospecting technique in the study of the geological section of the Siberian platform sedimentary cover is a near-field transient electromagnetic method (TEM) used for oil and gas exploration along with seismic prospecting. In recent years more and more signals complicated by the effect of induction-induced polarization (IIP) are registered. Interpretation of such signals in the horizontally stratified conductive models leads to errors when defining the resistivity of the sedimentary cover horizons located in the target interval of the section. The aim of the study has been to define the IIP-complicated transient response registered during the areal exploration for oil and gas, as well as to develop guidelines for interpreting the TEM data with the account of the induced polarization (IP). Using mathematical modeling, the IP effect has been evaluated for the transient characteristics calculated by the model in which the polarized horizon is located at different depths. Based on the TEM data inversion results considering the IP, the effectiveness of methodology has been validated. According to the inversion results, the IP manifestation is associated with the rocks in the upper part of the section. The nature of IP is explained by the presence of pyrite in the Jurassic and Upper Cambrian sediments. The resistivity distribution for the target horizons with the account of IP is lognormal. Applying the parameter characterizing the TEM curve divergence at the qualitative analysis stage allows the area zoning by the degree of IIP manifestation. Interpretation of the TEM data with the account of IP enhances the accuracy of the TEM data inversion and allows to obtain the models that are consistent with the geological structure of the survey area. Thus, it enables a detailed forecast of the reservoir properties of the subsalt sediments.

Keywords: TEM, induced polarization, Siberian craton

Information about the article: Received March 29, 2019; accepted for publication April 30, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Kompaniets S.V., Kozhevnikov N.O., Murzina E.V., Emelyanov V.S. Interpretation of near-field transient electromagnetic sounding data with the account of induction-induced polarization in areal exploration for oil and gas in the south of the Siberian craton. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 151–164. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164.

Введение

Изучение геоэлектрического строения разреза осадочного чехла юга Сибирской платформы в производственных масштабах началось в конце 50-х гг. прошлого века, когда были выполнены первые работы методами дипольного электрического зондирования, вертикального электрического зондирования, теллурических токов и магнитотеллурического зондирования.

На начальных этапах этих исследований широко использовались зондирования на постоянном токе (вертикальное электрическое зондирование, дипольное электрическое зондирование), которые сыграли важную роль в становлении структурной электроразведки. Однако недостатки, присущие этим методам, ограничили сферу их применения¹.

¹ Рабинович Б.И. Основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне: конспект лекций. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1987. 52 с. / Rabinovich B.I. TEM Fundamentals: lecture notes. Irkutsk: Irkutsk Polytechnic Institute Publ., 1983. 52 p.

Наличие мощных высокоомных пластов солей в разрезе, являющихся экраном, и необходимость увеличения разноса установки для изучения глубокозалегающих слоев предопределили использование методов переменного поля. Применение этих методов позволило за более чем 50 лет исследований на юге Сибирской платформы изучить распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) в земной коре и верхней мантии [1].

В настоящее время для решения нефтегазопроисловых задач в Восточной Сибири широко применяются зондирования методом становления поля в ближней зоне (ЗСБ).

При проведении работ методом ЗСБ используются многоканальные установки с источником в виде генераторной петли, длина стороны которой составляет 500–600 м. Применение таких установок позволяет идентифицировать эффект индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) и проводить инверсию данных ЗСБ с его учетом. Влияние вызванной поляризации (ВП) проявляется в виде расхождения переходных характеристик и их трансформант, таких как кривые кажущегося удельного сопротивления ($\rho_t(t)$) и кажущейся проводимости ($S_t(H_t)$), измеренных соосными и разнонесенными установками. Эти расхождения особенно значительны на поздних временах [2–4]. Анализ около 70000 кривых ЗСБ, зарегистрированных на юге Сибирской платформы, показал, что влиянию ВПИ подвержено более 60 % из общего числа индукционных переходных характеристик.

Интерпретация данных ЗСБ основана на инверсии, то есть подборе оптимальной геоэлектрической модели, объясняющей экспериментальные переходные характеристики. Инверсия проводится в ручном и автоматическом режимах. Инверсия в ручном режиме используется для подбора моделей на опорных точках, в этом случае опыт и знания

интерпретатора позволяют наиболее полно учесть априорные данные о геологическом строении района работ. Однако объем данных, получаемых в ходе площадных съемок, настолько велик, что для интерпретации этих данных с приемлемыми трудозатратами в разумные сроки необходимо использовать инверсию в автоматическом режиме. Геоэлектрические модели, полученные с помощью ручной инверсии, используются в качестве стартовых на этапе автоматической инверсии. Как при ручной, так и при автоматической инверсии данных ЗСБ, полученных на Сибирской платформе, неотъемлемым этапом является анализ и учет влияния ВПИ.

В данной статье мы на примере одного из участков в пределах Непско-Ботубинской антеклизы иллюстрируем подход к интерпретации площадных данных ЗСБ с учетом ВПИ.

Методика площадных работ

Для возбуждения и регистрации сигналов становления применяется многоканальная установка ЗСБ, которая включает генераторную петлю (источник) и несколько приемных петель (рис. 1). При площадной съемке методом ЗСБ, результаты которой рассматриваются в данной статье, размер источника составлял 600×600 м. Шесть приемных петель располагались на разносах 140 м (внутри петли), 510 и 900 м. Такая геометрия установки определяется необходимой глубиной исследований (2–3 км) в сочетании с имеющейся сетью сейсмических профилей для 3D-метода общей глубиной точки (200×200 м), которая используется для привязки и размещения источников и приемников поля. При интерпретации и представлении результатов принималось, что каждая точка ЗСБ пространственно совпадает с центром соответствующей приемной петли.

При площадных наблюдениях методом ЗСБ источники и приемники поля располагаются на участке работ по

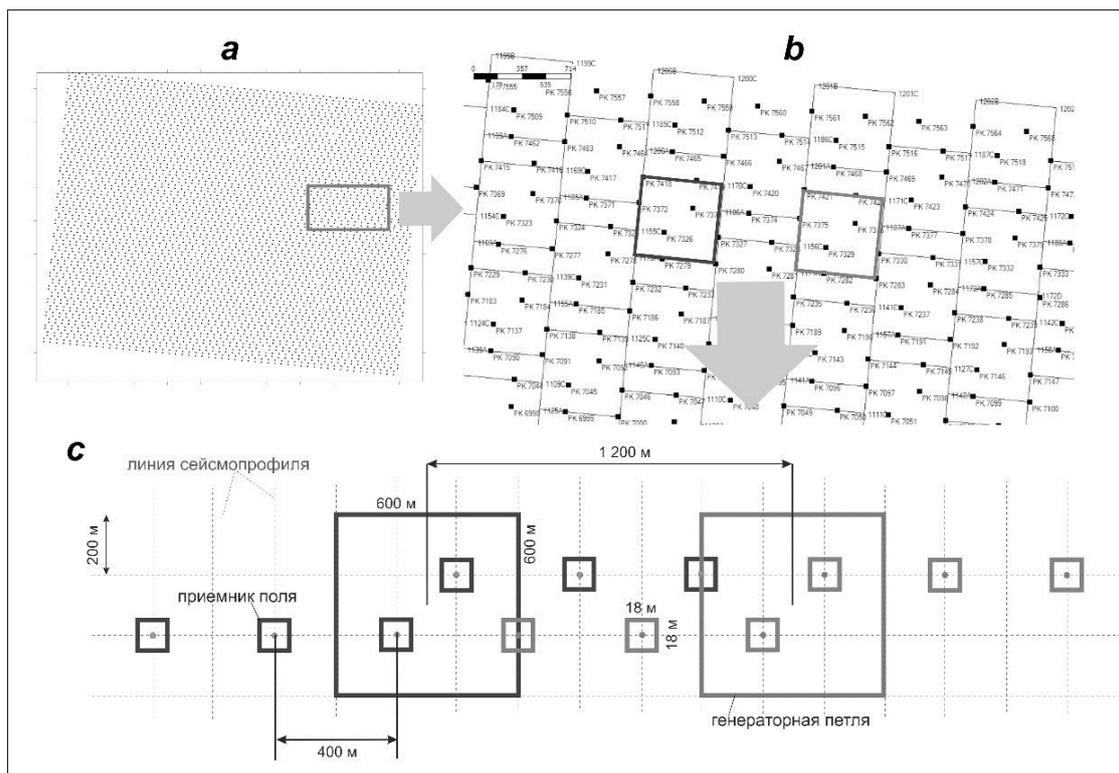


Рис. 1. Схема установок зондирования становлением поля в ближней зоне:
 а – схема точек зондирования становлением поля в ближней зоне; б – фрагмент сети источников и приемников поля, с – схема двух установок зондирования становлением поля в ближней зоне

Fig. 1. TEM array:

a – general view of survey area; b – network of field sources and receivers;
 c – combined in-loop/off-loop TEM configuration

равномерной сети. В рассматриваемом случае расстояние между профилями, на которых располагались приемники, составляло 200 м, расстояние между приемниками на профиле – 400 м. Максимальный ток в генераторной петле составлял 170 А, сигналы становления (переходные характеристики) регистрировались в диапазоне 0,03–500 мс [5].

Моделирование переходных индукционных характеристик с учетом вызванной поляризации

При расчете индукционных переходных характеристик с учетом ВПИ для математического описания процессов ВП наиболее часто используется формула Cole-Cole [6]:

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

где $j = \sqrt{-1}$; ω – круговая частота, рад/с; ρ_0 – удельное сопротивление на постоянном токе, Ом-м; η – поляризуемость, с – показатель степени ($0 < c \leq 1$); τ – время релаксации, с. Диапазон возможных значений параметра η – от нуля до единицы, τ – от нуля до бесконечности.

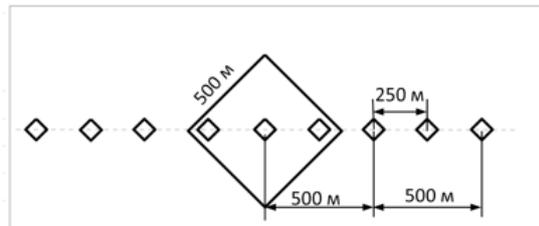
Математическое моделирование и практика интерпретации данных ЗСБ показывают, что эффект ВПИ сильнее всего проявляется, когда приемная располагается внутри генераторной. Когда приемная петля находится снаружи генераторной, увеличение разноса приводит к уменьшению относительного вклада ВПИ в суммарную переходную характеристику. Снижение влияния ВПИ при увеличении разноса тем заметнее, чем ближе к поверхности расположен поляризуемый слой.

Проиллюстрируем сказанное результатами математического моделирования применительно к геоэлектрической модели осадочного чехла Непско-Ботубинской антеклизы (рис. 2). Сигналы становления рассчитаны для установки ЗСБ с разносами 0, 250, 500, 750 и 1000 м. Сначала были рассчитаны переходные характеристики для модели с неполяризуемыми слоями, которая в дальнейшем использовалась в качестве референтной. Затем были рассчитаны переходные характеристики для моделей, в которых один из слоев (первый, третий, пятый, восьмой) был поляризуемым. Горизонты находятся на различной глубине и обладают одинаковым сопротивлением 40 Ом·м. Расчеты были выполнены для $\tau = 0,1$ с, $c = 0,4$ и двух

значений поляризуемости η (0,03 и 0,1). Согласно статистике результатов инверсии данных ЗСБ, на юге Сибирской платформы такие параметры модели Cole-Cole являются наиболее часто встречающимися.

При анализе результатов моделирования мы использовали так называемые нормированные переходные характеристики. Нормированная переходная характеристика $Y(t)$ отражает относительный вклад ВПИ в суммарный сигнал становления и рассчитывается как отношение электродвижущей силы (ЭДС) $\Delta U_{ВП}$ для поляризующейся модели к ЭДС ΔU для неполяризующейся (референтной) модели: $Y(t) = \Delta U_{ВП}(t) / \Delta U(t)$. Референтная модель идентична поляризующейся за исключением того, что

Номер слоя	ρ , Ом·м	h , м	Относит. отм. кровли, м	η	τ , мс	c
1	40	80	0	0.03, 0.1	0.1	0.4
2	100	80	80			
3	40	110	160	0.03, 0.1	0.1	0.4
4	320	385	270			
5	40	285	655	0.03, 0.1	0.1	0.4
6	80	280	940			
7	150	220	1220			
8	40	130	1440	0.03, 0.1	0.1	0.4
9	45	140	1570			
10	20	95	1710			
11	2000	500	1805			



Шифр графиков:

- 1 – поляризующийся слой на глубине 40 м;
- 2 – поляризующийся слой на глубине 160 м;
- 3 – поляризующийся слой на глубине 655 м;
- 4 – поляризующийся слой на глубине 1440 м.

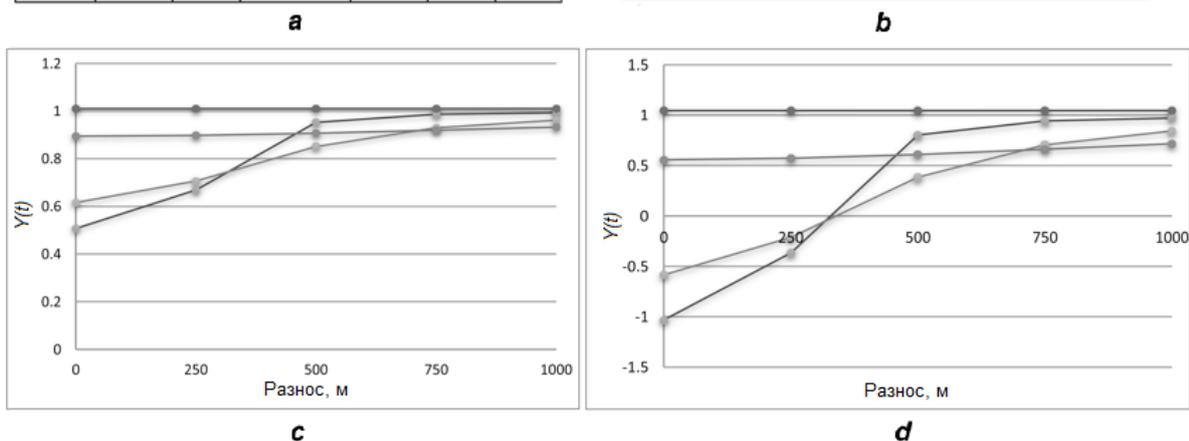


Рис. 2. Графики $Y(t)$ на времени $t = 0,4$ с в зависимости от разноса:

a – геоэлектрическая модель; b – схема установки зондирования становлением поля в ближней зоне; c – при поляризации слоя 0,1; d – при поляризации слоя 0,03

Шифр графиков – номер поляризующегося слоя на рис. 2, a

Fig. 2. $Y(t)$ plots, $t = 0.4$ s according to the offset:

a – geoelectric model; b – TEM array;

c – layer polarization of 0.1; d – layer polarization of 0.03

The number of graphs stands for the number of the polarized layer in Fig. 2, a

поляризуемость всех ее слоев равна нулю. Очевидно, чем больше отношение $\Delta U_{ВП}(t) / \Delta U(t)$ отличается от единицы, тем сильнее выражен эффект ВПИ на времени t [7].

На рис. 2 показано, как значения нормированной переходной характеристики на времени $t = 0,4$ с изменяются в зависимости от разноса и глубины залегания поляризующегося слоя. Выбор временной задержки при построении графиков основывается на том, что на данном значении t вклад ВПИ в результирующую переходную характеристику становится преобладающим.

По результатам математического моделирования наиболее чувствительной к ВП является приемная петля, расположенная внутри контура генераторной петли – отношение ЭДС, рассчитанной от модели с параметрами ВП к ЭДС без ВП, максимально.

Увеличение расстояния между источником и приемником поля приводит к ослаблению вклада ВПИ в суммарную переходную характеристику, и он тем больше, чем ближе к поверхности расположен поляризованный объект. Когда поляризующимся является первый горизонт, с ростом разноса от 0 до 1000 м для данной геоэлектрической модели влияние ВПИ убывает более чем в два раза.

Математическое моделирование и инверсия проводились с помощью программ MODEL 3 и 4 (Л.В. Суров, В.С. Емельянов, А.В. Поспеев), математическую основу которых образуют программные модули для решения прямой и обратной задач метода ЗСБ с учетом ВПИ («Зонд-Гео», А.Е. Каминский).

Интерпретация данных зондирования становлением поля в ближней зоне с учетом индукционно-вызванной поляризации

При площадных исследованиях объем данных значительно увеличивается по сравнению с тем, который

получают при профильных работах. Высокая плотность наблюдений при площадных работах (около 12 точек на 1 км²) является благоприятной предпосылкой для проведения трехмерной инверсии данных ЗСБ. Однако на практике возможности 3D-инверсии, особенно с учетом ВПИ, пока ограничены. Поэтому нами предложен и используется способ интерпретации данных массовых съемок ЗСБ на основе модели горизонтально-слоистой поляризуемой среды.

Алгоритм интерпретации включает в себя несколько этапов.

1. *Оценка расхождения ветвей кривых $S_{\tau}(H_{\tau})$.* На первом этапе оценивается влияние ВПИ на индукционные переходные характеристики. Используются трансформанта $S_{\tau}(H_{\tau})$ и параметр ΔS , характеризующий расхождение ветвей кривых ЗСБ, записанных на соосной и разнесенной установках на определенной кажущейся глубине [8]. Трансформанта кажущейся проводимости показывает изменение проводимости с кажущейся глубиной. Выбор глубины для оценки ΔS производится на отметке, на которой по статистике ВПИ уверенно проявляется расхождением ветвей кривых – более 2000 м (рис. 3).

$$\Delta S = \frac{S(H) - S_p}{S_p} \cdot 100 \%,$$

где $S(H)$ – суммарная кажущаяся проводимость на кажущейся глубине H , полученная на соосных кривых; S_p – среднее значение проводимости, полученное на разнесенных пикетах.

Чем сильнее проявлены эффекты ВПИ, тем меньше величина параметра ΔS , поскольку происходит отрицательный прирост на кривых $S_{\tau}(H_{\tau})$, зарегистрированных на соосном пикете.

На основе полученных значений строится карта ΔS , с помощью которой оценивается распространение влияния ВП по площади.

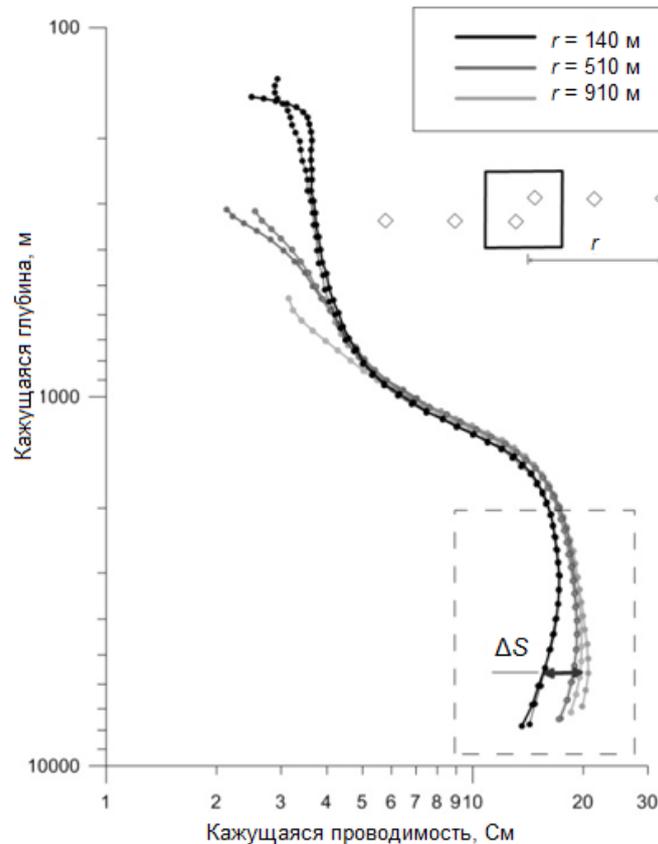


Рис. 3. Оценка ΔS по кривым кажущейся проводимости
Fig. 3. Estimate of ΔS by apparent conductivity curves

В геологических условиях Сибирской платформы кроме ВП на кривые становления могут оказывать влияние эффекты суперпарамагнетизма. В отличие от ВП влияние магнитовязких пород наблюдается на кривых ЗСБ в виде медленно убывающей ЭДС, однако знак различен для соосного пикета и разнесенных. При этом наименьшему влиянию подвержены кривые, зарегистрированные на разnose 1000 м. С увеличением временной задержки расхождение кривых увеличивается.

2. *Подбор геоэлектрических моделей на опорных точках.* На данном этапе среди всех точек, на которых кривые ЗСБ подвержены влиянию ВПИ, выбираются опорные точки и/или профили.

Для интерпретации кривых на опорных точках формируется априорная геоэлектрическая модель с учетом информации (геологическое строение, результаты бурения, геофизических исследований скважин (ГИС) и сейсморазведки). Данные сейсморазведки используются для задания мощностей геоэлектрических горизонтов (солевого и подсолевого комплексов), то есть для формирования структурного каркаса геоэлектрической модели. Учет априорной информации позволяет уменьшить область проявления эквивалентности при подборе геоэлектрической модели² [9, 10]. На основе данных ГИС, а также кажущейся проводимости горизонтов создается априорная модель УЭС.

² Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / под ред. И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. Т. 1. Тверь: Поли-ПРЕСС, 2018. 274 с. / Electrical prospecting: manual on electrical survey practice for students of geophysical specialties / edited by I.N. Modin, A.G. Yakovlev. Vol. 1. Tver: Poli-PRESS Publ., 2018. 274 p.

Для каждой многоразностной установки сначала выполняется инверсия переходных характеристик, измеренных на разнесенных установках. Полученные значения УЭС используются в качестве стартовых при инверсии переходных характеристик, зарегистрированных на соосных установках. Геоэлектрическая модель дополняется параметрами ВП и подбирается до достижения оптимальной невязки между практической и теоретической кривыми (на опорных точках).

3. Определение зависимости ΔS от поляризуемости η . Определение зависимости необходимо для получения стартового значения поляризуемости на всех точках ЗСБ с зафиксированным влиянием ВПИ на кривые. Для расчета зависимости используются опорные геоэлектрические модели, сформированные на этапе 2. Для каждой модели изменяются значения η с заданным шагом и рассчитываются кривые $S_{\tau}(H_{\tau})$ и расхождение кривых ΔS . Время релаксации τ и параметр s закрепляются.

4. Оценка поляризуемости (для площадных данных ЗСБ). С использованием полученной на этапе 3 зависимости $\Delta S(\eta)$ и фактического значения ΔS оценивается поляризуемость для всех точек зондирования, на которых выявлено влияние ВП.

5. Инверсия (для площадных данных ЗСБ). На данном этапе выполняется подбор геоэлектрических моделей для всех точек ЗСБ. В качестве стартовых используются модели, полученные на опорных точках или профилях. Если мощности можно определить по структурному каркасу, то они закрепляются.

На данном этапе обратная задача решается с помощью модуля автоматической инверсии с выбором графа, в котором задаются ограничения и условия подбора [11].

Подбор моделей проводится в соответствии с основными критериями: оптимальной невязкой и гладкостью

получаемых разрезов.

Оптимальная невязка между теоретической и практической кривыми обеспечивает не только приемлемое расхождение между ними, но и соответствие полученной геоэлектрической модели всей имеющейся априорной информации о геологическом строении изучаемого разреза.

Невязка представляет собой процентное расхождение практической и теоретической кривых δ и определяется по формуле:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_{\text{пр}}(t_i) - \rho_{\text{теор}}(t_i)}{\rho_{\text{пр}}(t_i)(n-1)} \right)^2},$$

где δ – относительная погрешность (расхождение, невязка); $\rho_{\text{пр}}(t)$, $\rho_{\text{теор}}(t)$ – значения кажущегося сопротивления на практической и на теоретической кривых соответственно на одном временном отсчете.

Гладкость получаемых разрезов – приемлемые (согласно данным геологии) различия моделей соседних точек, если это не диктуется априорными данными и самими кривыми зондирования.

Так, циклы инверсии повторяются для каждой точки до достижения оптимальной невязки, гладкости разрезов и карт, в виде которых представляются результаты интерпретации. Проиллюстрируем возможности этого подхода на примере одного из участков, расположенных в пределах Непского свода.

Геологическое строение участка работ

Участок работ, о котором идет речь, находится на юге Сибирской платформы, в восточной части Непско-Ботуобинской антеклизы, на Непском своде.

Геологическое строение осадочного чехла на участке работ типично для юга Сибирской платформы. Осадочный чехол сложен в большей части нижнепалеозойскими отложениями, зачастую осложненными последствиями пермотриасовой фазы магматизма [12]. Разрез

по литологическим и структурным признакам делится на три комплекса:

– надсолевой терригенный, сложенный преимущественно песчаниками, аргиллитами и алевролитами;

– карбонатно-галогенный, представленный известняками и доломитами, перемежающимися с пластами каменной соли;

– подсолевой, в свою очередь разделяющийся на карбонатную часть, состоящую преимущественно из известняков и доломитов, и терригенную часть, представленную песчаниками и алевролитами.

Геологический разрез в районе исследований осложнен тектоническими нарушениями различного возраста – от древних до современных. По данным скважин глубокого бурения в ангарской свите присутствует трапповая интрузия мощностью до 110 м.

Нижнекембрийские отложения осадочного чехла залегают на разновозрастных метаморфизованных и кристаллических породах фундамента с угловым или стратиграфическим несогласием.

На поверхности около 70 % территории присутствуют юрские отложения. Они покрывают водораздельные пространства и представлены песчаниками, песками, галечниками, глинами, алевролитами, аргиллитами, местами с мало-мощными линзовидными прослоями углей.

Метод ЗСБ применялся здесь для картирования перспективных в нефтегазоносном отношении коллекторов в подсолевой части разреза, оценки их фильтрационно-емкостных свойств и насыщения, картирования траппов и тектонических нарушений.

Результаты работ

Кривые кажущегося сопротивления, зарегистрированные на участке, свидетельствуют о влиянии ВПИ. Расхождения между кривыми, полученными на разносах 140, 500 и 900 м на поздних (более

40 мс) временах, отмечаются для 80 % общего объема данных (4482 точки ЗСБ). При одинаковых разносах кривые ρ_{τ} совпадают (рис. 4).

После обработки данных ЗСБ, включавшей фильтрацию, осреднение и суммирование сигналов, была проведена интерпретация данных ЗСБ в соответствии с описанным выше подходом.

Распространение ВПИ на участке работ иллюстрирует карта параметра ΔS на кажущейся глубине 3000 м (рис. 5, а). Отрицательный знак параметра свидетельствует о влиянии ВП. Согласно карте ΔS , влияние ВП сильнее всего выражено на юго-востоке участка; по мере продвижения в северо-западном направлении это влияние уменьшается.

Для точек ЗСБ, расположенных на опорных профилях, выполнен подбор моделей и определены зависимости $\Delta S(\eta)$, на основе которых рассчитаны значения поляризуемости и проведена автоматическая инверсия данных по всей площади.

По результатам автоматической инверсии значения η составляют 0,01–0,15 (рис. 5, б). Время релаксации τ и показатель степени c закрепились на уровне, обеспечивающем оптимальную невязку всего массива данных в зонах с проявлением эффекта ВПИ ($\tau = 0,1$ с, $c = 0,6$). Кроме того, поскольку литологический состав юрских отложений не меняется по площади, есть основание предполагать, что свойства пород, которые характеризуются данными параметрами (структурно-текстурные особенности пород, состав), малоизменчивы.

По данным описания керна водозаборных скважин, находящихся южнее изучаемого участка, в породах усть-кутской свиты юры и верхней части верхоленской и илгинской свит кембрия (в интервале глубин от 0 до 150 м), отмечены агрегаты пирита [13]. Кроме этого, имеются пропластки каменного угля и углестых аргиллитов, с которыми могут быть

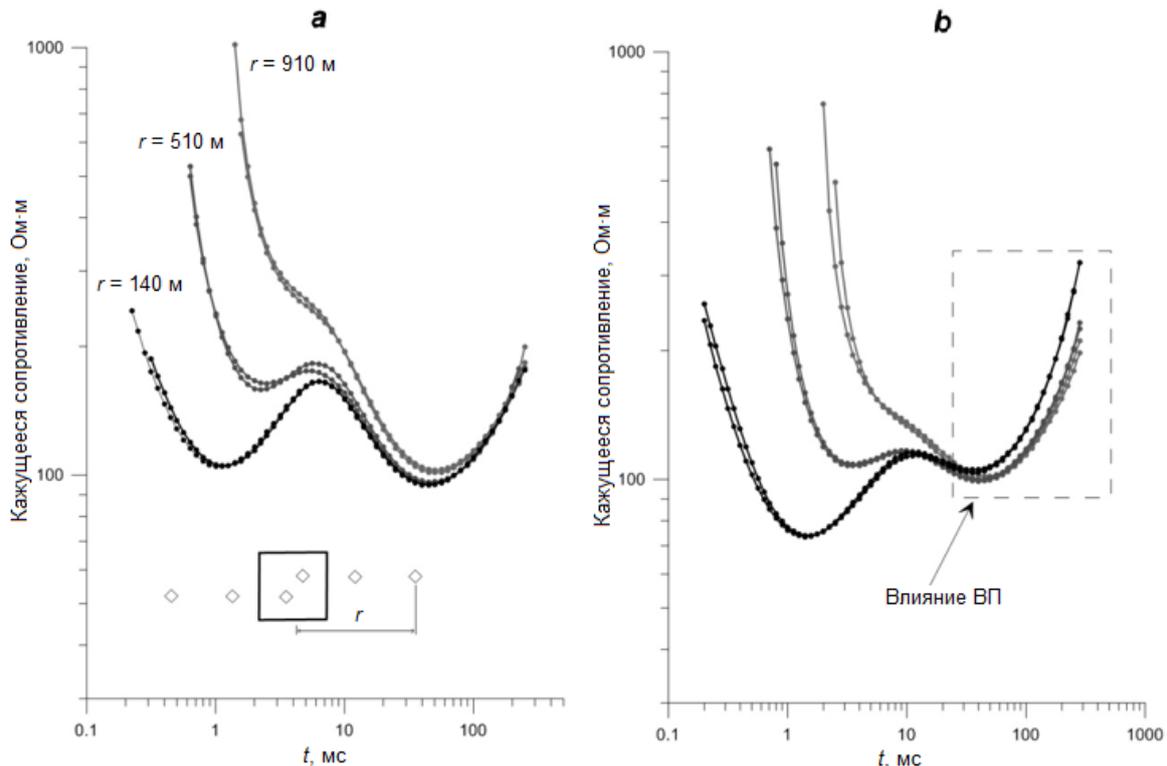


Рис. 4. Типичные кривые кажущегося удельного сопротивления на участке работ:
 а – без влияния вызванной поляризации; б – с влиянием вызванной поляризации
Fig. 4. Typical curves of apparent resistivity at the working site:
 а – without IP influence; б – with IP influence

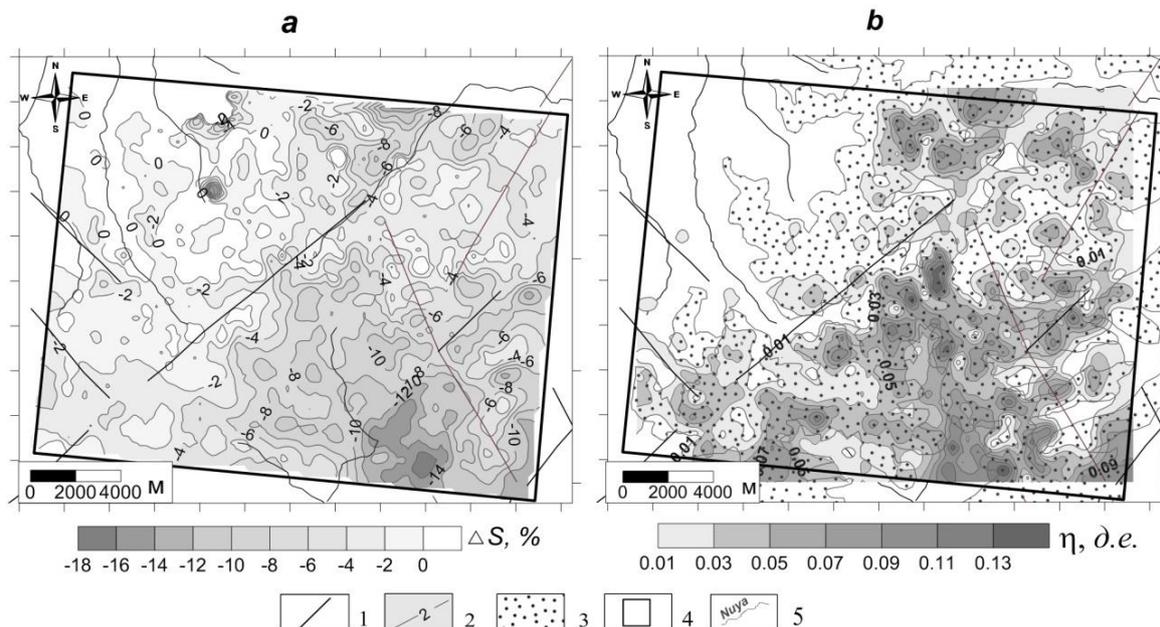


Рис. 5. Карты расхождения кривых кажущейся проводимости ΔS (а) и поляризуемости (б):
 1 – тектонические нарушения по данным геологической карты; 2 – изолиния параметра ΔS для рис. а, изолинии поляризуемости для рис. б; 3 – распространение юрских пород по данным геологической карты 1:200000; 4 – контур участка работ; 5 – гидросеть
Fig. 5. Divergence maps for apparent conductivity ΔS curves (а) and polarizability (б):
 1 – tectonic disturbances according to the geological map data; 2 – ΔS parameter isoline for fig. а, polarization isolines for fig. б; 3 – distribution of Jurassic rocks according to the geological map 1:200000; 4 – contour of the working site; 5 – rivers

связаны проявления ВП. Согласно источнику [6], значения $\tau = 0,1$ с и $\eta = 0,1-0,3$ характерны для осадочных пород с объемным содержанием сульфидов 0,5–5%. Сопоставление карт поляризуемости и геологической карты, на которой видно распространение юрских пород, позволяет предполагать связь повышенной поляризуемости и юрских отложений (см. рис. 5, b).

Как упоминалось, основной геологической задачей работ ЗСБ является картирование и определение параметров нефтегазоперспективных коллекторов в подсолевом комплексе, и при ее решении отсутствие учета ВПИ приводит к ошибкам прогноза параметров целевых объектов. В ходе интерпретации подсолевой комплекс на исследуемом участке был разделен на три подгоризонта; перспективными являются верхний (карбонатный) и нижний (преимущественно терригенного состава). На гистограммах (рис. 6) представлены распределения продольного сопротивления верхнего подгоризонта подсолевой части осадочного чехла, найденные с учетом и без учета ВП. Без учета ВП пик распределения сдвигается в сторону высоких значений УЭС и более трети от числа всех значений УЭС превышают 80 Ом·м. При

учете параметров ВП сопротивления изменяются в пределах 35–57 Ом·м. Данный диапазон УЭС, согласно статистике, свидетельствует о наличии коллектора, что подтверждено результатами бурения скважин.

Выводы

С помощью применения многообразных регистрирующих систем возможно выявлять и диагностировать ВПИ. Анализ проявления ВПИ и расчет параметра ΔS , который характеризует расхождение кривых кажущейся проводимости, измеренных на различных разносах, позволяют оконтурить поляризующиеся породы на площади и сформировать априорную модель, используемую в качестве стартовой для инверсии кривых ЗСБ, полученных в ходе площадных съемок. Данный подход сокращает время, необходимое для инверсии площадных данных ЗСБ.

Учет ВПИ при проведении инверсии данных ЗСБ приводит к уменьшению невязки, лучшему соответствию моделей геологическим данным и, соответственно, к повышению точности прогноза параметров и свойств коллекторов. В большинстве случаев прогноз подтвержден бурением.

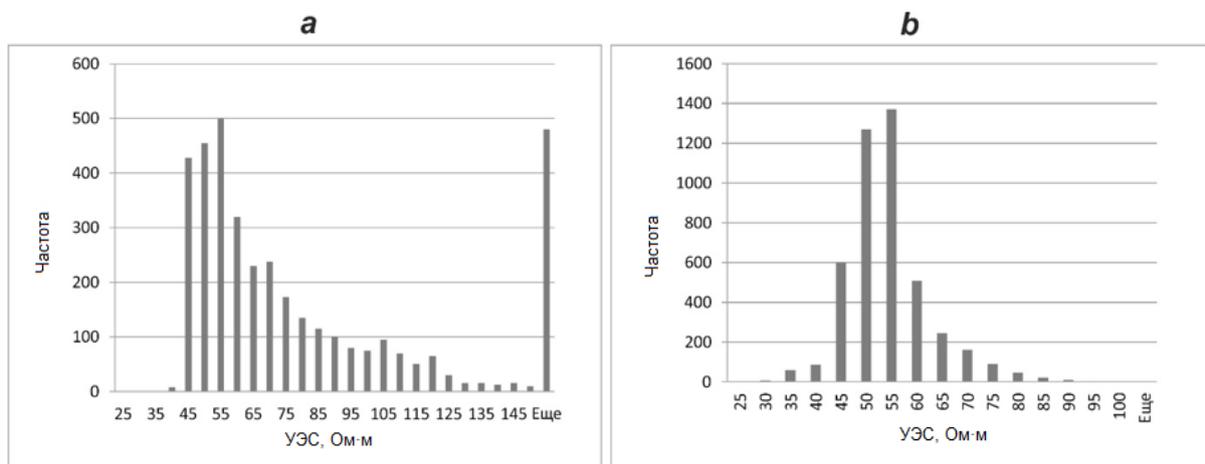


Рис. 6. Гистограммы удельного электрического сопротивления целевого горизонта, построенные по результатам инверсии кривых зондирования становлением поля в ближней зоне на участке без учета (а) и с учетом (б) вызванной поляризации
Fig. 6. Target horizon resistivity histograms plotted at the site by the TEM curve inversion results, with no account of IP (a) and with the account of IP (b)

Согласно результатам инверсии, проявления ВПИ связаны с породами верхней части разреза с параметрами: $\rho = 25\text{--}80 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\eta = 0,01\text{--}0,15$; $\tau = 0,1 \text{ мс}$;

$c = 0,6$. Природа ВП связывается нами с присутствием пирита в отложениях юры и верхнего кембрия.

Библиографический список

1. Поспеева Е.В., Поспеев В.И. Результаты глубинных магнитотеллурических исследований в Якутской алмазаносной провинции // Обеспечение научно-технического прогресса при геофизических исследованиях в Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск; Новосибирск: Изд-во СНИИГ-ГИМС, 1987. С. 107–116.
2. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Компаниец С.В. Проявления и учет индукционно-вызванной поляризации верхней части разреза Восточной Сибири // ГЕО-Сибирь. 2011. Т. 2. № 2. С. 185–191.
3. Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Проявление и учет индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ // Геофизика. 2013. № 1. С. 35–40.
4. Стогний В.В., Коротков Ю.В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск: Малотиражная типография 2D, 2010. 121 с.
5. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. № 1 (31). С. 20–24.
6. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics. 1978. Vol. 43. P. 588–609.
7. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. № 4. С. 104–118.
8. Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Буддо И.В., Гомульский В.В. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5 (100). С. 53–60.
9. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Компаниец С.В., Токарева О.В., Мисюреева Н.В., Гомульский В.В., Суворов Л.В., Ильин А.И., Емельянов В.С., Мурзина Е.В., Гусейнов Р.Г., Семинский И.К., Шарлов Р.В., Вахромеев А.Г., Сень Е.А. Современная практическая электроразведка. Новосибирск: Гео, 2018. 231 с.
10. Компаниец С.В., Токарева О.В., Поспеев А.В., Семинский И.К. К вопросу о возможности использования данных бокового каротажа при формировании геоэлектрической модели осадочного чехла юга Сибирской платформы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 5 (88). С. 53–57.
11. Мурзина Е.В., Емельянов В.С., Поспеев А.В., Агафонов Ю.А. Подход к оценке качества автоматической инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований // Стрoение литосферы и геодинамика: тез. докл. XXVII Всерос. молодежн. конф. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2017. С. 159–161.
12. Геология нефти и газа Сибирской платформы / под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука. М.: Недра, 1981. 552 с.
13. Шкиря М.С., Давыденко Ю.А. О связи наличия углеводородов и эпигенетических сульфидов на юге Якутии // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 523–529. <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.5.523>.

References

1. Pospeeva E.V., Pospeev V.I. *Rezultaty glubinnyykh magnitotelluricheskikh issledovaniy v Yakutskoi almazanosnoi provintsii* [The results of deep magnetotelluric investigations in the Yakutsk diamond-bearing province]. *Obespechenie nauchno-tekhnicheskogo progressa pri geofizicheskikh issledovaniyakh v Vostochnoi Sibiri* [Digest of articles. Support of scientific and technical progress in geophysical research in Eastern Siberia]. Irkutsk; Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources Publ., 1987, pp. 107–116. (In Russ.).
2. Antonov E.Yu., Kozhevnikov N.O., Kompaniets S.V. The manifestation of and allowing for the inductively induced polarization of the near-surface in Eastern Siberia. *GEO-Sibir'* [GEO-Siberia], 2011, vol. 2, no. 2, pp. 185–191. (In Russ.).
3. Kompaniets S.V., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. The manifestation of and allowing for the inductively induced polarization in TEM sounding studies of sedimentary cover in the south of Siberian platform. *Geofizika* [Russian Geophysics], 2013, no. 1, pp. 35–40. (In Russ.).

4. Stognii V.V., Korotkov Yu.V. *Poisk kimberlitovykh tel metodom perekhodnykh protsessov* [Exploration for kimberlite bodies by TEM]. Novosibirsk: Malotirazhnaya tipografiya 2D Publ., 2010, 121 p. (In Russ.).

5. Sharlov M.V., Agafonov Yu.A., Stefanenko S.M. Modern telemetric electromagnetic prospecting systems *SGS-TEM* and *FastSnap*. Efficiency and usage expertise. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki* [Devices and Systems of Exploration Geophysics], 2010, no. 1 (31), pp. 20–24. (In Russ.).

6. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 1978, vol. 43, pp. 588–609.

7. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Impulse-inductive electrical survey of polarizable medium. *Geofizicheskii zhurnal* [Geophysical Journal], 2009, vol. 31, no. 4, pp. 104–118. (In Russ.).

8. Guseinov R.G., Petrov A.V., Agafonov Yu.A., Sharlov M.V., Buddo I.V., Gomul'skii V.V. Quality control system for transient electromagnetic soundings. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 5 (100), pp. 53–60. (In Russ.).

9. Pospeev A.V., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., Sharlov M.V., Kompaniets S.V., Tokareva O.V., Misyurkeeva N.V., Gomul'skii V.V., Surov L.V., Il'in A.I., Emel'yanov V.S., Murzina E.V., Guseinov R.G., Seminskii I.K., Sharlov R.V., Vakhromeev A.G., Sen' E.A.

Sovremennaya prakticheskaya elektrorazvedka [Modern electrical survey practice]. Novosibirsk: Geo Publ., 2018, 231 p. (In Russ.).

10. Kompaniets S.V., Tokareva O.V., Pospeev A.V., Seminskii I.K. To possibility of using lateral logging data when building geoelectric models of Southern Siberian platform sedimentary cover. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 5 (88), pp. 53–57. (In Russ.).

11. Murzina E.V., Emel'yanov V.S., Pospeev A.V., Agafonov Yu.A. *Podkhod k otsenke kachestva avtomaticheskoi inversii dannykh vysokoplotnykh elektromagnitnykh zondirovaniy* [Approach to assessing the quality of automatic inversion of high-density electromagnetic sounding data]. *Tez. dokl. XXVII Vseros. molodezhn. konf. "Stroenie litosfery i geodinamika"* [Heads of reports, 27th All-Russian youth' conference "Lithosphere structure and geodynamics"]: Irkutsk: Institute of the Earth's crust, SB RAS Publ., 2017, pp. 159–161. (In Russ.).

12. Kontorovich A.E., Surkov B.C., Trofimuk A.A. *Geologiya nefi i gaza Sibirskoi platformy* [Geology of oil and gas of the Siberian craton]. Moscow: Nedra Publ., 1981, 552 p. (In Russ.).

13. Shkirya M.S., Davydenko Yu.A. On the relationship between the presence of hydrocarbons and epigenetic sulfides in the south of Yakutia. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2017, vol. 227, pp. 523–529. (In Russ.) <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.5.523>.

Критерии авторства / Authorship criteria

Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Мурзина Е.В., Емельянов В.С. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Sofia V. Kompaniets, Nikolai O. Kozhevnikov, Ekaterina V. Murzina, Vyacheslav S. Emelyanov are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of the article.

Сведения об авторах / Information about the authors



Компаниец Софья Викторовна,
ведущий геофизик,
Иркутское электроразведочное предприятие,
664011, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а, Россия,
e-mail: ksv@ierp.ru
Sofia V. Kompaniets,
Senior geophysicist,
Irkutsk Electrical Prospecting Company,
2a, Rabochaya St., Irkutsk, 664011, Russia,
e-mail: ksv@ierp.ru



Кожевников Николай Олегович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия,
профессор кафедры геофизики,
Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Nikolai O. Kozhevnikov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Chief Researcher at the Laboratory of Geoelectrics,
Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
3, Prospekt Koptuga, Novosibirsk, 630090, Russia,
Professor at Geophysics Department,
Novosibirsk State University,
1, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru



Мурзина Екатерина Викторовна,
аспирант,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
геофизик,
Иркутское электроразведочное предприятие,
664011, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а, Россия,
e-mail: bkV@ierp.ru

Ekaterina V. Murzina,
Post-graduate student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
Geophysicist,
Irkutsk Electrical Prospecting Company,
2a, Rabochaya St., Irkutsk, 664011, Russia,
e-mail: bkV@ierp.ru



Емельянов Вячеслав Сергеевич,
геофизик,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: evs@ierp.ru

Vyacheslav S. Emelyanov,
Geophysicist,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128, Lermontov St., Irkutsk, 664054, Russia,
e-mail: evs@ierp.ru