ГЕОФИЗИКА

Краткое сообщение
УДК 550.03
EDN: RSPKFO
DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-381-388

Возможности уменьшения стартовой глубины исследований в методе становления электромагнитного поля

© А.В. Поспеев[a], И.В. Буддо[b], Д.Ф. Абсалямова[c]✉

[a,b]Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия
[b]Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия
[a,c]АО «Иркутское электроразведочное предприятие», Иркутск, Россия

Резюме. В ходе проведенной работы рассматривались возможности уменьшения стартовой глубины исследований в методе зондирования становлением электромагнитного поля за счет определения величины эффективного разноса. Актуальность решения данной задачи заключалась в необходимости применения индуктивной электроразведки с использованием незаземленных соосно-разнесенных установок в природно-климатических условиях Арктики. Оптимизация технологии проведения исследований методом зондирования становлением электромагнитного поля в дальней и ближней зонах позволит расширить диапазон изучаемых глубин, что крайне важно для исследований скоплений трудноизвлекаемых углеводородов, залегающих на глубинах от первых десятков метров до 3–4 км. При решении данной задачи для модели полупространства было произведено математическое моделирование сигналов зондирования становлением электромагнитного поля с учетом геометрического разноса, что позволило за счет решения обратной задачи определить эффективный разнос. На основе полученных данных была построена номограмма зависимости эффективного разноса от размера генераторной петли и геометрического разноса установки. Использование полученных в ходе исследования результатов позволяет обеспечивать фактическую стартовую глубинность электромагнитных зондирований от 7–10 м, что существенно повышает диапазон изучаемых глубин за счет интерпретации дальней зоны зондирования.

Ключевые слова: электромагнитные зондирования, зондирования становлением поля, ближняя и дальняя зоны зондирования, многоразносные установки, математическое моделирование, Арктика

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы № 1023110300018-4-1.5.4 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в молодежной лаборатории комплексных исследований Арктики Института земной коры СО РАН (г. Иркутск).

Для цитирования: Поспеев А.В., Буддо И.В., Абсалямова Д.Ф. Возможности уменьшения стартовой глубины исследований в методе становления электромагнитного поля // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 4. С. 381–388. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-381-388. EDN: RSPKFO.

GEOPHYSICS

Brief report

Reducing starting depth in the transient electromagnetic method

© Alexander V. Pospeev[a], Igor V. Buddo[b], Daria F. Absalyamova[c]✉

[a,b]Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia
[b]Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
[a,c]JSC Irkutsk Electroprospecting Company, Irkutsk, Russia

Abstract. The article considers the possibilities of reducing the starting depth of studies using the near-field transient electromagnetic method by determining the effective transmitter-receiver offset. The solution of this problem is relevant due to the need to apply inductive electromagnetic exploration using ungrounded multi-offset templates in the climatic conditions of the Arctic. Optimization of the transient electromagnetic method technology in the far- and near-field zones will expand the range of explored depths, which is extremely important for studying the accumulations of difficult to recover hydrocarbons located at depths from the first tens of meters to 3–4 km. To solve this problem for a half-space model, mathematical

© Поспеев А.В., Буддо И.В., Абсалямова, Д.Ф., 2024

modeling of the transient electromagnetic signals was carried out taking into account the geometric spacing of soundings, which allowed to determine the effective signal offset by solving the inverse problem. On the basis of the mathematical modeling performed, a nomogram of the effective offset dependence on the transmitter loop size and template geometric spacing has been built. The use of the results obtained makes it possible to provide the actual starting depth of electromagnetic soundings from 7–10 m, which significantly increases the range of the studied depths due to the interpretation of the far-field sounding zone.

Keywords: electromagnetic soundings, transient electromagnetic sounding (TEM sounding), near- and far-field zones, multi-spacing sounding installations, mathematical modeling, Arctic

Funding: The research was carried out under the topic no. 1023110300018-4-1.5.4 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the Youth Laboratory of Integrated Arctic Research of the Institute of the Earth's Crust SB RAS (Irkutsk).

For citation: Pospeev A.V., Buddo I.V., Absalyamova D.F. Reducing starting depth in the transient electomagnetic method. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(4):381-388. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-381-388. EDN: RSPKFO.

Введение

Уменьшение стартовой глубины исследований в методе зондирования становлением электромагнитного поля (ЗС) за счет определения величины эффективного разноса актуально ввиду необходимости применения индуктивной электроразведки с использованием незаземленных соосно-разнесенных установок в природно-климатических условиях Арктики [1, 2]. Оптимизация технологии проведения работ методом зондирования становлением электромагнитного поля в дальней (ЗСД) и ближней (ЗСБ) зонах позволит расширить диапазон изучаемых глубин [3], что крайне важно для исследований скоплений трудноизвлекаемых углеводородов, залегающих на глубинах от первых десятков метров до 3–4 км. Последние десятилетия электромагнитные методы широко применяются для решения геологических задач (как для верхней части разреза, так и для глубоких интервалов) [4, 5].

Метод ЗС с импульсным контролируемым источником основан на изучении поля переходных процессов, которое при изменении тока в источнике возбуждается в земле [6, 7]. В зависимости от времени зондирования, разноса между источником и приемником, а также геоэлектрической модели среды существуют две основные зоны зондирования: волновая, когда электромагнитное поле распространяется по воздуху подобно волне, и ближняя, когда оно проникает в землю диффузионным способом [8, 6]. Технологии современных нестационарных электромагнитных зондирований предусматривают использование многоразносных установок, существенно повышающих детальность исследований и позволяющих обеспечивать устойчивую оценку геоэлектрических параметров разреза в условиях наличия частотной дисперсии электрических свойств пород [9, 10]. Тем не менее в процессе инверсии, как правило, используется диапазон времен, преимущественно относящийся к ближней зоне зондирования, что существенно увеличивает стартовую глубинность исследований при использовании больших разносов [11, 12].

Следующей проблемой является то, что использование формулы кажущегося сопротивления для ближней зоны на ранних временах становления приводит к формированию левых ветвей кривых ρ_k, не отражающих истинное удельное сопротивление среды [13]. Прямой расчет по формуле волновой зоны зондирования с использованием реального разноса между источником и приемником дает искаженный уровень кривых, не отвечающий реальной геоэлектрической модели.

Рассмотрение практических кривых волновой зоны зондирования показывает, что ранее некоторых времен, пропорциональных размеру генераторной петли (магнитного диполя), кривая ЗСБ не реагирует на изменение электропроводности среды. Таким образом, повышение стартовой глубинности ЗС за счет определения эффективного разноса установки является важной задачей, требующей решения.

Материалы и методы исследования

Генераторная петля индуцирует магнитное поле, которое внутри контура источника имеет положительное, а за пределами – отрицательное направление[1]. После переключения тока в источнике формируется электромагнит-

[1] Захаркин А.К. Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «Цикл». Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1981. 98 с.

ная волна, имеющая два пути распространения: волновой (по воздуху) и диффузионный (в среде) [14]. Во втором случае поле вертикального магнитного диполя не зависит от разноса, поэтому в формуле расчета кажущегося сопротивления ρ_τ разнос между приемником и источником не вводится (1):

$$\rho_\tau(\text{ЗСБ}) = \frac{K}{\left(\frac{\Delta V}{I}\right)^{2/3} \cdot t^{5/3}}, \quad (1)$$

где K – коэффициент установки, м; $\frac{\Delta V}{I}$ – сигнал электромагнитного поля, В/А; t – время становления, с.

В отличие от этого, электродвижущая сила в волновой зоне для вертикальной магнитной компоненты (установки *Q–q* (петля – петля)) убывает обратно пропорционально пятой степени разноса (2):

$$\rho_\tau(\text{ЗСД}) = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \cdot \quad (2)$$

После выключения тока волна не может мгновенно достичь приемника, поскольку ей необходимо преодолеть расстояние между ним и генераторным контуром[2] [15]. Если приемник расположен внутри источника, то эффективный разнос больше геометрического (равен нулю для соосной остановки). При расположении приемника за пределами источника он, наоборот, меньше геометрического [16] (рис. 1).

Моделирование сигналов становления для однородного полупространства с использованием прямой задачи А.М. Каминского[3] показывает, что амплитуда поля на ранних временах становления соответствует не расстоянию между центрами генераторного и проемного диполей, а некоторому отличающемуся от него эффективному разносу. Расчет кривых ЗСБ выполнялся для источника размером 500×500 м, приемника – 18×18 м, для полупространства с удельным электрическим сопротивлением 10 Ом·м.

Результаты исследования и их обсуждение

Кривые ЗСД и ЗСБ в приведенной системе координат рассчитаны с использованием ис-

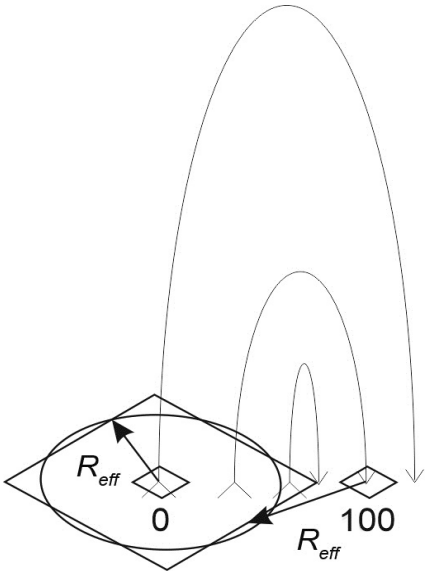

Рис. 1. Схема формирования эффективного разноса методом зондирования становлением электромагнитного поля (индексами указан размер геометрического разноса (0 и 100 м))
Fig. 1. Diagram of effective offset formation by the method of near-field transient electromagnetic sounding (indices show the size of geometric spacing (0 and 100 m))

тинного разноса зондирования [17]. Отличие положения левых ветвей кривых зондирований от удельного электрического сопротивления однородного полупространства $\rho_{\text{пп}}$, для которого проведены расчеты (в данном случае – 10 Ом·м) [18], уменьшается с ростом геометрического разноса. Анализ полученных данных позволил реализовать решение обратной задачи, то есть по амплитуде сигналов на ранних временах определить эффективный разнос зондирования. Поскольку

$$\rho_\tau(\text{ЗСД}) = \frac{R^5}{M \cdot m} \cdot \frac{\Delta V}{I}, \quad (3)$$

где R – геометрический разнос установки, м; M – момент источника, м²; m – момент приемника, м², эффективный разнос R_{eff} составит

$$R_{eff} = \left[\rho_{\text{пп}} \cdot M \cdot m \Big/ \frac{\Delta V}{I}\right]^{1/5}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{пп}}$ – сопротивление однородного полупространства, Ом·м.

[2] McNeill J.D. Application of transient electromagnetic techniques: technical note TN-7. Missasauga: Geonics Limited, 1980. 17 p. Режим доступа: https://geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn7.pdf (дата обращения: 17.09.2024).
[3] Каминский А.М. Программа ZondTEM2d. Режим доступа: http://zond-geo.com/software/electromagnetic-soundings/zondirovanie-stanovleniem-polya-zondtem2d/ (дата обращения: 06.11.2024).

Расчет кривых волновой зоны с использованием определенного таким образом эффективного разноса позволил привести кривые ЗСД к уровню удельного сопротивления однородного полупространства.

На следующем этапе было выполнено математическое моделирование сигналов ЗСБ для генераторных петель с длиной стороны, составляющей 100, 200, 400, 500 и 800 м, и разносами от 0 до 1000 м. По модельным сигналам в соответствии с формулой (4) рассчитаны эффективные разносы, на основании чего построена номограмма (рис. 2), которая позволяет рассчитать эффективный разнос как функцию длины стороны генераторной петли и расстояния между центрами источника и приемника. Рассмотрение практических (полученных в полевых условиях) кривых, зарегистрированных с использованием малоглубинной установки ЗСБ с малыми стартовыми временами зондирования, показывает, что в достаточно большом диапазоне начальных времен $\rho_\tau(\text{ЗСД})$ практически не меняет уровень, то есть эффект зондирования среды отсутствует.

Для оценки стартовой глубины зондирования, в частности для установки 100×100 м с разносом 100 м, была рассчитана серия кривых над модельным геоэлектрическим разрезом с высоким контрастом удельного электрического сопротивления слоев. Модель содержит стартовый слой толщиной 2 м, дальнейшие имеют толщину, увеличивающуюся в геометрической прогрессии. Удельное электрическое сопротивление нечетных слоев составляет 50 Ом·м, четных – 5000 Ом·м.

Исходная модель является стартовой (0, левая модель); затем удельное электрическое сопротивление первого четного слоя заменяется удельным сопротивлением, равным 50 Ом·м, так происходит и с последующими четными слоями до того, как кривая ЗСД не приобретет в диапазоне волновой зоны зондирования горизонтальную форму (рис. 3). Результаты расчетов для источника размером 100×100 м и разносом 100 м показаны на рис. 4.

Как мы видим, кривые, расположенные дальше третьей модели, не различаются. Мощность верхнего слоя во второй модели, которая демонстрирует изменения кривой зондирования, равна примерно 10 м. То есть фактическая стартовая глубинность составляет 7–10 м.

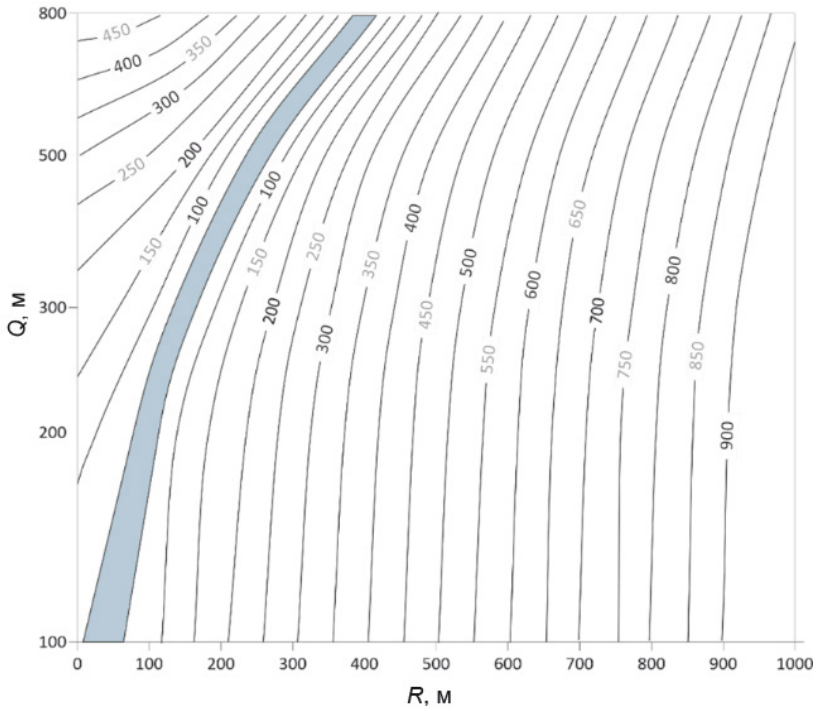

Рис. 2. Номограмма зависимости эффективного разноса R_{eff} от размера генераторной петли Q и геометрического разноса установки R (залитая область соответствует пространственному положению неустойчивого нестационарного поля источника)

Fig. 2. Nomogram of effective offset R_{eff} dependence on Q generator loop size and R installation geometric offset (the filled area corresponds to the spatial position of the unstable non-stationary field of the source)

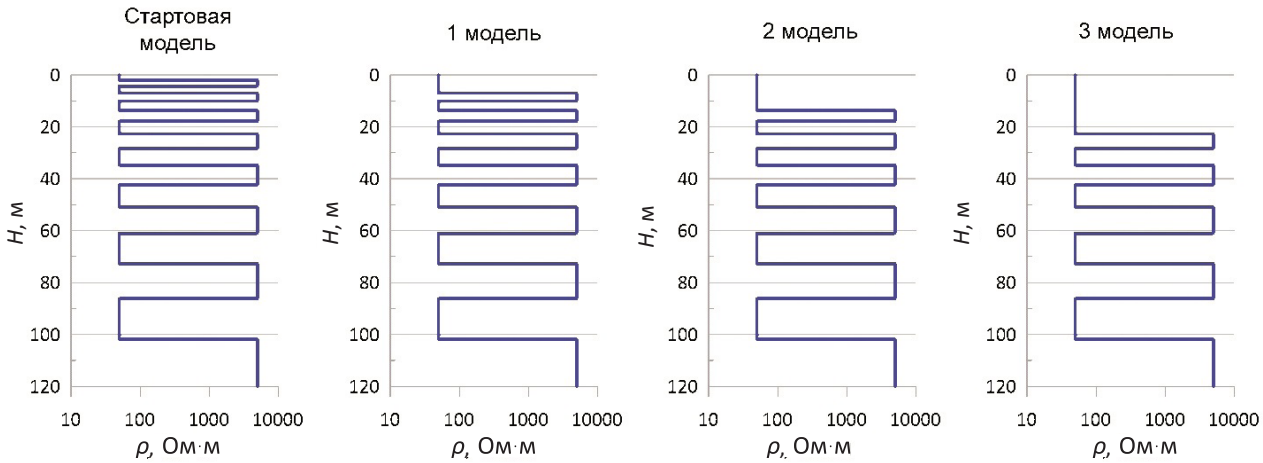

Рис. 3. Геоэлектрические модели для расчета стартовой глубинности методом зондирования становлением электромагнитного поля
Fig. 3. Geoelectric models for starting depth calculation by the transient electromagnetic sounding

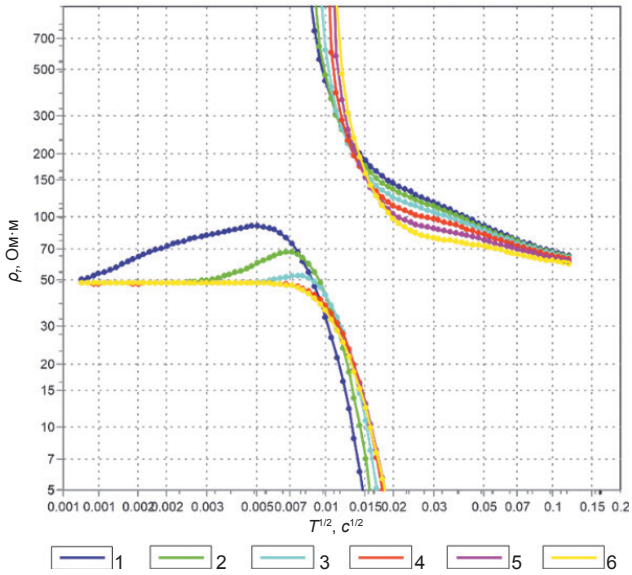

Рис. 4. Модельные кривые для установки 100×100 м с разносом 100 м:
1 – стартовая модель; 2 – первая модель; 3 – вторая модель; 4 – третья модель; 5 – четвертая модель; 6 – пятая модель
Fig. 4. Model curves for a 100×100 m transmitter loop with a 100 m space:
1 – starting model; 2 – 1st model; 3 – 2nd model; 4 – 3d model; 5 – 4th model; 6 – 5th model

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать вывод о том, что использование сигналов становления поля на ранних временах позволяет уменьшить стартовую глубину зондирования без уменьшения размера генераторной петли. Расчет кривых волновой зоны зондирования с использованием эффективного разноса позволяет привести уровень кривых ЗСД к удельному электрическому сопротивлению слоя с эффективной глубиной исследования, зависящей от размера источника и параметров геоэлектрического разреза.

Полученные в ходе проведенной работы результаты повышают информативность электромагнитных зондирований путем вовлечения в интерпретацию ранних времен становления поля, относящихся к дальней зоне зондирования. Применение указанного способа открывает возможность детализации геоэлектрической модели среды, характеризующей верхнюю часть разреза, что существенно увеличивает достоверность решения геологических задач для рассмотренного интервала глубин [19, 20].

Список источников

1. Павленко В.И., Коротков Ю.В. Особенности и экономическая эффективность использования электроразведочного метода переходных процессов для инженерно-геологических изысканий в районах севера и Арктики России // Арктика: экология и экономика. 2012. № 4. С. 40–45. EDN: PXDAJJ.
2. Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Шелохов И.А., Агафонов Ю.А., Смирнов А.С., Нежданов А.А. Электроразведочные исследования ЗСБ для изучения криолитозоны арктической зоны Западной Сибири // PROНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2023. Т. 8. № 3. С. 102–114. https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-3-102-114. EDN: EJKNCT.
3. Ваньян Л.Л. Становление электромагнитного поля и его использование для решения задач структурной геологии. Новосибирск: Наука, 1966. 168 с.
4. Баталева Е.А., Мухамадеева В.А. Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 2. С. 461–487. https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0356. EDN: UVUNPA.
5. Баранов М. А., Компаниец С. В., Буддо И. В., Мисюркеева Н. В., Агафонов Ю. А. Возможности электромагнитных зондирований при картировании многолетнемерзлых пород // Вестник ИрГТУ. 2014. № 7. С. 25–31. EDN: SIJXIX.
6. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109 с.
7. Кауфман А.А., Морозова Г.М. Теоретические основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне. Новосибирск: Наука, 1970. 124 с.
8. Шейнман С.М. Современные физические основы теории электроразведки. Л.: Недра, 1969. 224 с.
9. Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Мурзина Е.В., Емельянов В.С. Интерпретация данных зондирования методом становления поля в ближней зоне с учетом индукционно-вызванной поляризации при площадных нефтегазопоисковых исследованиях на юге Сибирской платформы // Науки о Земле и недропользование. 2019. Т. 42. № 2. С. 151–164. https://doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164. EDN: WSDYQV.
10. Буддо И.В., Поспеев А.В. Прецизионная инверсия данных ЗСБ при поисках нефти и газа на юге Сибирской платформы. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. 149 с.
11. Parasnis D.S. Principles of applied geophysics. London: Chapman & Hall, 1996. 456 p.
12. Компаниец С.В., Токарева О.В., Поспеев А.В., Семинский И.К. К вопросу о возможности использования данных бокового каротажа при формировании геоэлектрических моделей осадочного чехла юга Сибирской платформы // Вестник ИрГТУ. 2014. № 5. С. 53–57. EDN: SGJFAB.
13. Li X., Xue G., Yin C. Migration Imaging of the transient electromagnetic method. Singapore: Springer, 2017. 148 p.
14. Попов С.Б. Исследование боковой воздушной электромагнитной волны в электроразведке // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 128. С. 1–36. https://doi.org/10.20948/prepr-2020-128. EDN: YKACDI.
15. Kearey P., Brooks M., Hill I. An introduction to geophysical exploration // Blackwell Science. 2002. Vol. 140. Iss. 3. P. 366–366. https://doi.org/10.1017/S0016756803378021.
16. Reynolds J.M. An Introduction to applied and environmental geophysics. Chichester: John Wiley & Sons, 1997. 796 p.
17. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Компаниец С.В., Токарева О.В. [и др.]. Современная практическая электроразведка: монография. Новосибирск: Гео, 2018. 231 с. https://doi.org/10.21782/B978-5-9909584-1-8. EDN: VTWOGC.
18. Ратушняк А.Н., Байдиков С.В. Импульсные индуктивные электромагнитные зондирования слоистых сред // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей: материалы Всеросс. конф. с междунар. участием (г. Екатеринбург, 20–24 сентября 2021 г.). Екатеринбург: Изд-во ИГФ УрО РАН, 2021. С. 200–204. EDN: CILVZA.
19. Матвеев Б.К. Интерпретация электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1974. 232 с.
20. Куликов В.А., Каминский А.Е., Яковлев А.Г. Совместная двумерная инверсия данных электротомографии и аудиомагнитотеллурических зондирований при решении рудных задач // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 9–19. https://doi.org/10.18454/PMI.2017.1.9. EDN: YGCWJV.

References

1. Pavlenko V.I., Korotkov Yu.V. Features and economic efficiency of using the electromagnetic sounding method of transient processes for engineering-geological surveys in the northern and Arctic regions of Russia. *Arctic: Ecology and Economy.* 2012;4:40-45. (In Russ.). EDN: PXDAJJ.
2. Misyurkeeva N.V., Buddo I.V., Shelokhov I.A., Agafonov Yu.A., Smirnov A.S., Nezdanov A.A. Transient electromagnetic surveys for the cryolithozone studies of the Western Siberia arctic zone. *PROneft. Professionals about Oil.* 2023;8(3):102-114. (In Russ.). https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-3-102-114. EDN: EJKNCT.
3. Van'jan L.L. Formation of electromagnetic field and its application for solving structural geology problems. Novosibirsk: Nauka, 1966. 168 p.
4. Bataleva E.A., Mukhamadeeva V.A. Complex electromagnetic monitoring of geodynamic processes in the Northern Tien Shan (Bishkek geodynamic test area). *Geodynamics & Tectonophysics.* 2018;9(2):461-487. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0356. EDN: UVUNPA.
5. Baranov M., Kompaniets S., Buddo I., Misyurkeeva N., Agafonov Yu. Electromagnetic sounding potential for permafrost rocks mapping. *Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2014;7:25-31. (In Russ.). EDN: SIJXIX.

6. Van'jan L.L. *Fundamentals of electromagnetic sounding.* Moscow: Nedra; 1965, 109 p. (In Russ.).
7. Kaufman A.A., Morozova G.M. *Theoretical foundations of the near-field transient EM sounding method.* Novosibirsk: Nauka; 1970, 124 p. (In Russ.).
8. Sheinman S.M. *Modern physical foundations of the electrical prospecting theory.* Leningrad: Nedra; 1969, 224 p. (In Russ.).
9. 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. *Earth sciences and subsoil use.* 2019;42(2):151-164. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164. EDN: WSDYQV.
10. Buddo I.V., Pospeev A.V. *Precision inversion of TEM in oil and gas exploration in the south of the Siberian platform.* Irkutsk: Irkutsk State University; 2019, 149 p. (In Russ.).
11. Parasnis D.S. *Principles of applied geophysics.* London: Chapman & Hall; 1996, 456 p.
12. Kompaniets S., Tokareva O., Pospeev A., Seminsky I. To possibility of using lateral logging data when building geoelectric models of southern Siberian Platform sedimentary cover. *Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2014;5:53-57. (In Russ.). EDN: SGJFAB.
13. Li X., Xue G., Yin C. *Migration Imaging of the transient electromagnetic method.* Singapore: Springer; 2017, 148 p.
14. Popov S.B. Investigation of a lateral air electromagnetic wave in electrical prospecting. *Keldysh Institute Preprints.* 2020;128:1-36. https://doi.org/10.20948/prepr-2020-128. EDN: YKACDI.
15. Kearey P., Brooks M., Hill I. An Introduction to geophysical exploration. *Blackwell Science.* 2002;140(3):366-366. https://doi.org/10.1017/S0016756803378021.
16. Reynolds J.M. *An Introduction to applied and environmental geophysics.* Chichester: John Wiley & Sons; 1997, 796 p.
17. Pospeev A.V., Buddo I.V., Agafonov Y.A., Sharlov M.V., Kompaniec S.V., Tokareva O.V., et al. *Modern applied electroprospecting*. Novosibirsk: Geo; 2018, 231 p. (In Russ.). https://doi.org/10.21782/B978-5-9909584-1-8. EDN: VTWOGC.
18. Ratushnyak A., Baidikov S. Pulse inductive electromagnetic sensing of layered media. In: *Glubinnoe stroenie, geodinamika, teplovoe pole Zemli, interpretatsiya geofizicheskih polei: materialy Vseross. konf. s mezhdunar. uchastiem = Deep structure, geodynamics, thermal field of the Earth, interpretation of geophysical fields: materials of the All-Russian conference with International participation.* 20–24 September 2021, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Bulashevich Institute of Geophysics; 2021, p. 200-204. EDN: CILVZA.
19. Matveev B.K. *Interpretation of electromagnetic soundings.* Moscow: Nedra; 1974, 232 p.
20. Kulikov V.A., Kaminskij A.E., Yakovlev A.G. Joint two-dimensional inversion of electrotomography and audio magnetotelluric probing data in solving ore problems. *Journal of Mining Institute.* 2017;223:9-19. (In Russ.). https://doi.org/10.18454/PMI.2017.1.9. EDN: YGCWJV.

Информация об авторах / Information about the authors

Поспеев Александр Валентинович,
член-корреспондент РАЕН,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
заместитель главного геофизика,
АО «Иркутское электроразведочное предприятие»,
г. Иркутск, Россия,
avp@crust.irk.ru
https://orcid.org/0000-0001-5938-1942
Alexander V. Pospeev,
Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professsor,
Leading Researcher,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Deputy Chief Geophysicist,
JSC Irkutsk Electroprospecting Company,
Irkutsk, Russia,
avp@crust.irk.ru
https://orcid.org/0000-0001-5938-1942

Буддо Игорь Владимирович,
кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией комплексной геофизики,
лабораторией комплексных исследований Арктики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
доцент кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
biv@crust.irk.ru
https://orcid.org/0000-0002-5204-9530
Igor V. Buddo,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Integrated Geophysics,
Laboratory of Integrated Arctic Research,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
biv@crust.irk.ru
https://orcid.org/0000-0002-5204-9530

Абсалямова Дарья Фахрулловна,
геофизик,
АО «Иркутское электроразведочное предприятие»,
г. Иркутск, Россия,
✉ absalyamovadf@rusgeology.ru
https://orcid.org/0009-0009-5602-5358
Daria F. Absalyamova,
Geophysicist,
JSC Irkutsk Electroprospecting Company,
Irkutsk, Russia,
✉ absalyamovadf@rusgeology.ru
https://orcid.org/0009-0009-5602-5358

Вклад авторов / Contribution of the authors

А.В. Поспеев – разработка концепции, написание черновика рукописи.
И.В. Буддо – разработка концепции, написание рукописи – рецензирование и редактирование.
Д.Ф. Абсалямова – курирование данных, написание черновика рукописи.
Alexander V. Pospeev – conceptualization, writing – original draft.
Igor V. Buddo – conceptualization, writing – review & editing.
Daria F. Absalyamova – data curation, writing – original draft.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 13.11.2024; одобрена после рецензирования 16.12.2024; принята к публикации 23.12.2024.
The article was submitted 13.11.2024; approved after reviewing 16.12.2024; accepted for publication 23.12.2024.