



К БЕСКОНТАКТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В МЕТОДЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ: ДАННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Д. КАРИНСКИЙ, А.А. ИВАНОВ*, Е.Д. ЕФИМОВ, И.А. ЗУДЕНКОВ

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В электроразведке методом сопротивлений существует давно признанная проблема, связанная с необходимостью надежного заземления измерительных электродов, что затруднительно или невозможно в условиях многолетнемерзлых пород, скальных грунтов, снежного покрова или искусственных покрытий. Бесконтактные измерения позволяют решить эту проблему и ускорить процесс съемки. Однако исторически теоретическое обоснование такого подхода базировалось на приближенных методах, а не на строгих решениях.

Цель. Целью данной работы является теоретическое обоснование методики бесконтактных измерений в методе сопротивлений на основе строгого решения прямой задачи электродинамики. Исследование направлено на анализ компонент электромагнитного поля и определение оптимальных условий для корректного определения удельного электрического сопротивления (УЭС) грунта.

Материалы и методы. Исследование проведено методом математического моделирования для двух моделей сред: двухслойной (воздух — проводящее полупространство) и трехслойной (воздух — промежуточный слой — проводящее полупространство). Моделирование выполнялось для предельной дипольно-осевой установки, расположенной на малой высоте над поверхностью, при частоте переменного тока 16 кГц. Расчет поля основан на строгом решении системы уравнений электродинамики. Анализировались амплитуда полной напряженности электрического поля E_x и модуль реактивной компоненты $\text{Re } E_x$.

Результаты. Показано, что традиционный подход, использующий амплитуду полного поля E_x для расчета кажущегося УЭС (ρ_k), на малых разностях дает аномально высокие значения, не зависящие от ρ_2 , из-за влияния поля зарядов на концах токового диполя. В отличие от этого, расчет ρ_k по реактивной компоненте $\text{Re } E_x$ позволяет исключить это влияние. Для двухслойной модели определен оптимальный разнос (8—10 м), обеспечивающий наилучшее соответствие между ρ_k и ρ_2 . Для трехслойной модели показано, что слой с высоким УЭС эквивалентен увеличению высоты подъема установки, а слой с низким УЭС существенно осложняет интерпретацию.

Заключение. Разработан и обоснован новый подход к бесконтактным измерениям в методе сопротивлений, основанный на использовании реактивной компоненты электрического поля. Этот подход позволяет повысить достоверность определения удельного электрического сопротивления подстилающих пород. Результаты работы открывают перспективы для создания эффективной аппаратуры и методики бесконтактной электроразведки, применимой в сложных условиях заземлений.

Ключевые слова: электроразведка, метод сопротивлений, бесконтактные измерения, решение прямой задачи, математическое моделирование

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Каринский А.Д., Иванов А.А., Ефимов Е.Д., Зуденков И.А. К бесконтактным измерениям в методе сопротивлений: данные математического моделирования. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2025;67(4):102—109. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-4-102-109> EDN: [SEENZD](https://www.edn.ru/SEENZD)

Статья поступила в редакцию 10.11.2025
Принята к публикации 25.11.2025
Опубликована 22.12.2025

* Автор, ответственный за переписку

REVISITING THE ISSUE OF CONTACTLESS MEASUREMENTS IN THE RESISTANCE METHOD: MATHEMATICAL SIMULATION DATA

ALEXANDR D. KARINSKIY, ANDREY A. IVANOV*, EVGENIY D. EFIMOV, IVAN A. ZUDENKOV

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

ABSTRACT

Background. The resistivity method of electromagnetic survey has a long-recognized problem associated with the need for reliable grounding of measuring electrodes, which is difficult or impossible in conditions of permafrost, rocky soils, snow cover, or artificial surfaces. Contactless measurements solve this problem and speed up the survey process. However, the theoretical justification for this approach is historically based on approximate methods rather than rigorous solutions.

Aim. To theoretically substantiate the technique of contactless measurements in the resistance method using rigorous forward solution of electrodynamic equations. The study aims to analyze the components of the electromagnetic field and determine the optimal conditions for the correct assessment of the specific electrical resistance (SER) of soil.

Materials and methods. The study is conducted using the mathematical simulation of two medium models: two-layer (air–conductive half-space) and three-layer (air–intermediate layer–conductive half-space). The simulation is performed for a low-altitude dipole-axis array at an AC frequency of 16 kHz. The field calculation is based on a rigorous solution to the system of electrodynamic equations. The amplitude of the total electric field strength E_x and the modulus of the reactive component $\operatorname{Re} E_x$ are analyzed.

Results. The standard approach using the amplitude of the total field E_x to calculate the apparent SER (ρ_a) at small spacings gives anomalously high values independent of ρ_2 due to the field effect of charges at the ends of the current dipole. In contrast, the calculation of ρ_a based on the reactive component $\operatorname{Re} E_x$ excludes this effect. For a two-layer model, an optimal spacing of 8–10 m was established to provide the best match between ρ_a and ρ_2 . For a three-layer model, the high-SER layer is equivalent to an increase in the height of instrument lift, while the layer with low resistivity significantly complicates the interpretation.

Conclusion. An advanced approach to contactless measurements in the resistance method using the reactive component of the electric field is developed and substantiated. This approach increases the reliability of determining the specific electrical resistance of underlying rocks. The results of the study open up prospects for the development of effective equipment and methods for contactless electromagnetic survey applicable in complex grounding conditions.

Keywords: electromagnetic survey, resistance method, contactless measurements, forward simulation, mathematical simulation

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: the study had no sponsorship.

For citation: Karinskiy A.D., Ivanov A.A., Efimov E.D., Zudenkov I.A. Revisiting the issue of contactless measurements in the resistance method: Mathematical simulation data. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2025;67(4):102–109. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-4-102-109> EDN: SEENZD

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ /
 GEOPHYSICAL METHODS OF PROSPECTING AND EXPLORATION

Manuscript received 10 November 2025
 Accepted 25 November 2025
 Published 22 December 2025

* Corresponding author

Еще лет 50 назад были начаты исследования с целью обоснования возможности применения бесконтактных измерений в электроразведке методом сопротивлений. Необходимость применения такой модификации возникает при проведении измерений в зонах многолетнемерзлых пород, скальных грунтов, при наличии снежного покрова или такого непроводящего искусственного покрытия, как асфальт или бетон. Кроме того, отсутствие необходимости заземления токовых и измерительных электродов позволяет значительно ускорить процесс измерений. Некоторые результаты таких исследований были опубликованы, например, в работах [4, 7, 8, 9].

Теоретическое обоснование применения бесконтактных измерений и интерпретации получаемых результатов основывалось не на «строгом» решении соответствующей прямой задачи электродинамики, а на приближенных подходах. И, судя по недавним публикациям наших коллег, положение с теоретическим обоснованием метода до сих пор существенно не изменилось. Например, часть работы [2] посвящена обоснованию тех ограничений, которые имеет применяемая приближенная методика расчетов.

Ниже представлены некоторые, полученные на основе «строгого» решения соответствующей прямой задачи электродинамики, результаты математического моделирования для расположенной на небольшой высоте h над проводящим полупространством предельной дипольно осевой установки $BAMN$.

Понятно, что проведение бесконтактных измерений в методах сопротивления возможно лишь при переменном токе I в питающей линии AB . Некоторые результаты математического модели-

рования при переменном токе $I = I_0 \times \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$ в электроразведке методом сопротивлений были приведены в статьях [5, 6]. Основой для получения решения задачи послужила методика, описанная в книге [3]. Эта же методика была применена при получении приведенных ниже результатов моделирования.

Начнем с относительно простой модели. На рисунке 1 показана модель, для которой были получены результаты расчетов, приведенные в статье [6] и на рисунке 2 в этой работе. Горизонтальная плоскость S разделяет полупространства V_1 и V_2 . Генераторный (AB) и измерительный (MN) диполи расположены в полупространстве V_1 (в воздухе) на оси X , параллельной S , на малой высоте h_1 над границей S . Компоненту E_x напряженности электрического поля \mathbf{E} , которой пропорционально напряжение E_{MN} поля \mathbf{E} в предельно короткой измерительной линии MN , определяет несобственный интеграл в смысле главного значения ([1], с. 96—101). Подынтегральная функция содержит функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка. Для вычисления таких интегралов было применено преобразование Эйлера.

Представленные в этой работе результаты моделирования получены при частоте $f = 16$ кГц. Это «рабочая» частота, которая была выбрана для нескольких видов аппаратуры при бесконтактных измерениях в методах сопротивлений [9]. При наших расчетах для проводящего полупространства была задана диэлектрическая проницаемость $\epsilon_2 = 10$. Хотя при указанном значении f выбор величины ϵ_2 несуществен, так как при любых, реальных для горных пород, значениях ϵ можно пренебречь влиянием токов смещения в нижнем полупространстве. То есть в проводящем

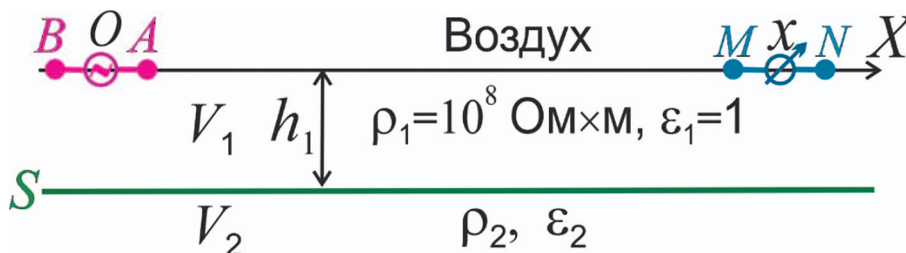


Рис. 1. Двухслойная модель среды и электроразведочная установка
 Fig. 1. Two-layer model of the environment and electrical exploration installation

полупространстве электромагнитное поле — квазистационарное:

$$2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_2 \cdot \rho_2 \ll 1, \quad (1)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная.

Напротив, при тех же частотах f и при очень высоких значениях ρ_1 в верхнем полупространстве (в воздухе) справедливо неравенство:

$$2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_1 \cdot \rho_1 \gg 1. \quad (2)$$

В модели, показанной на рисунке 1, электрическое поле с напряженностью \mathbf{E} создают следующие четыре возбудителя.

1. Электрические заряды $\pm e$ на концах отрезка AB . Как показано в [1] (с. 73), при токе $I = I_0 \times \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$ и выполнении неравенства (1) $e \approx \epsilon_0 \times \rho_2 \times I_0 \times \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$. То есть величины этих зарядов пропорциональны ρ_2 и они меняются синхронно с изменением тока I . Заметим, что если заземленная линия AB лежит на границе S , то при заданном токе I заряд $e \approx 2\epsilon_0 \times \rho_2 \times I_0 \times \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$. Однако если линия AB расположена в воздухе и справедливо неравенство (2), то $e \approx (I_0 / (2\pi \cdot f \cdot \epsilon_1)) \times \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$. То есть изменение со временем этих (не зависящих от ρ_2) зарядов $\pm e$ и компонент создаваемого ими кулонова поля \mathbf{E} отличается по фазе от тока I на $\pi/2$.

2. Индукционное поле \mathbf{E} , возбуждаемое первичным магнитным полем отрезка AB тока I . Это поле вообще не зависит от параметров среды.

3. Индукционное поле \mathbf{E} , возбуждаемое объемными токами проводимости, а также токами смещения. В окрестности диполя AB такая составляющая поля переменного электрического диполя не зависит от электрических параметров среды (см. [1], с. 75). С увеличением расстояния от диполя и удельной электропроводности среды доля индукционной составляющей поля \mathbf{E} возрастает, и эта составляющая зависит от удельной электропроводности $\gamma_2 = 1/\rho_2$.

4. Кулоново поле \mathbf{E} , создаваемое поверхностными зарядами с поверхностной плотностью s , индуцированными на границе S . Это поле зависит от коэффициента контрастности границы S , и, следовательно, именно эта составляющая поля \mathbf{E} зависит от удельного электрического сопротивления ρ_2 проводящего полупространства.

На рисунке 2 представлены зависимости кажущихся удельных электрических сопротивлений $\rho_k(E_x)$ и $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ от разноса x при $h = 5$ см и при трех значениях удельного электрического сопротивления ρ_2 . Приведенные на этом рисунке значения ρ_k определены двумя способами. Величины $\rho_k(E_x)$

определены «стандартным» способом — по амплитуде $|E_x| = \sqrt{(\text{Re } E_x)^2 + (\text{Im } E_x)^2}$ компоненты E_x , где $\text{Re } E_x$ — реактивная составляющая, меняющаяся синфазно либо в противофазе со сторонним током I в отрезке AB , а $\text{Im } E_x$ — активная составляющая, отличающаяся по фазе от тока I на $\pi/2$. То есть $\rho_k(E_x) = K \times |E_x| / I_0$, где $K = \pi \cdot x^3$ — коэффициент предельной дипольно-осевой установки, расположенной на поверхности проводящего полупространства. Понятно, что для показанной на рисунке 1 модели на величину $|E_x|$ может оказывать существенное влияние поле зарядов $\pm e$, величины которых не зависят от ρ_2 . Значения $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ определены по модулю реактивной компоненты $\text{Re } E_x$. Понятно, что на эту компоненту не оказывают влияния заряды $\pm e$ на концах отрезка AB .

На рисунке 2 видим, что при малых разносах на величину $\rho_k(E_x)$ практически не влияют значения ρ_2 , так как величина $|E_x|$ зависит в основном от зарядов $\pm e$. При больших разносах и очень высоких значениях ρ_2 (1000 Ом·м) величины $\rho_k(E_x)$ соответствуют значениям ρ_2 , но при более низких ρ_2 (100, 10 Ом·м) определить ρ_2 по $\rho_k(E_x)$ вряд ли возможно. При дальнейшем увеличении разноса значения $\rho_k(E_x)$ выходят на известную в методах сопротивлений «индукционную асимптоту».

Совсем по-другому «выглядят» приведенные на рисунке 2 зависимости $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ от разноса x . У них нет не зависящих от ρ_2 anomalно высоких значений ρ_k при малых разносах, так как составляющая $\text{Re } E_x$ не зависит от поля зарядов $\pm e$ на концах отрезка AB . Но при этом зависимости $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ от разноса «осложнены» тем,

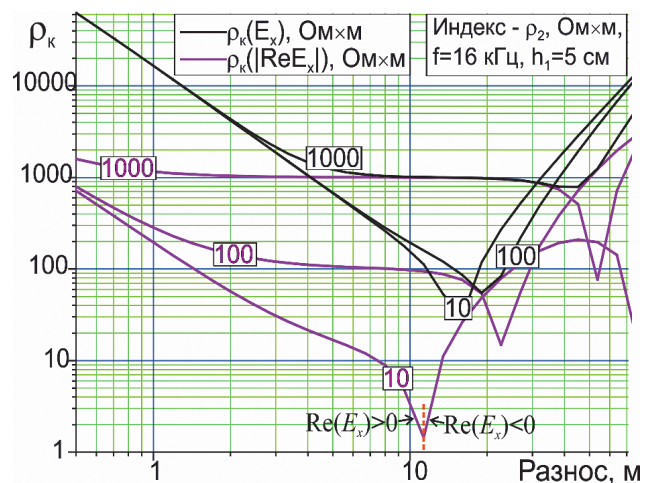


Рис. 2. Зависимости $\rho_k(E_x)$ и $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ от разноса x при нескольких значениях ρ_2

Fig. 2. Dependences of $\rho_k(E_x)$ and $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ on the spacing x for several values of ρ_2

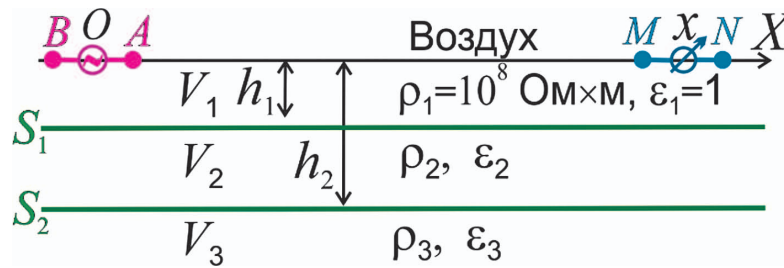


Рис. 3. Трехслойная модель среды и электроразведочная установка
Fig. 3. Three-layer model of the environment and electrical exploration installation

что с увеличением разноса составляющая $\text{Re } E_x$ меняет знак. Поэтому для определения ρ_2 по $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ в зависимости от f и ожидаемых пределов изменения ρ_2 на основе результатов математического моделирования следует выбрать «оптимальный» разнос. Из показанных на рисунке 2 результатов моделирования следует, что при частоте $f = 16$ кГц и $10 \text{ Ом}\cdot\text{м} \leq \rho_2 \leq 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ таким оптимальным является разнос $x \approx 8\text{—}10$ м.

Перейдем к результатам моделирования, полученным для более сложной и приближающейся к возможным реальным условиям при проведении бесконтактных измерений модели. На рисунке 3 показана трехслойная модель горизонтально-слоистой среды. Верхнее полупространство V_1 — воздух, нижнее полупространство V_3 — однородные по ρ горные породы, а слой V_2 при высоких значениях ρ_2 может отвечать асфальту или бетону, а при низких ρ_2 — например, влажному почвенному слою. При разработке алгоритма расчетов для этой модели потребовалось получить решение системы 8 уравнений с 8 неизвестными.

На рисунке 4 приведены зависимости $\rho_k(E_x)$ и $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ от разноса x при высоком значении удельного сопротивления ρ_2 . Эти зависимости не имеют коренных отличий от тех, которые были приведены на рисунке 2. Присутствие в проводящем полупространстве слоя V_2 с высоким ρ_2 сказывается на этих зависимостях примерно так, как если бы в модели на рисунке 2 высота h_1 была заменена на большее значение h_2 (см. рис. 3).

Зависимости $\rho_k(E_x)$ и $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ от разноса x на рисунке 5 получены при низком значении удельного сопротивления ρ_2 . В этом случае, особенно при высоком значении ρ_3 , определение истинного удельного сопротивления ρ_3 как по $\rho_k(E_x)$, так и по $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ может быть затруднено. Это, по-видимому, обусловлено особенностями распределения поверхностных зарядов, индуцированных на границах S_1, S_1 при $\rho_1 \gg \rho_2 \ll \rho_3$.

Проведенное математическое моделирование на основе строгого решения прямой задачи электродинамики подтвердило принципиальную возможность применения бесконтактных измерений

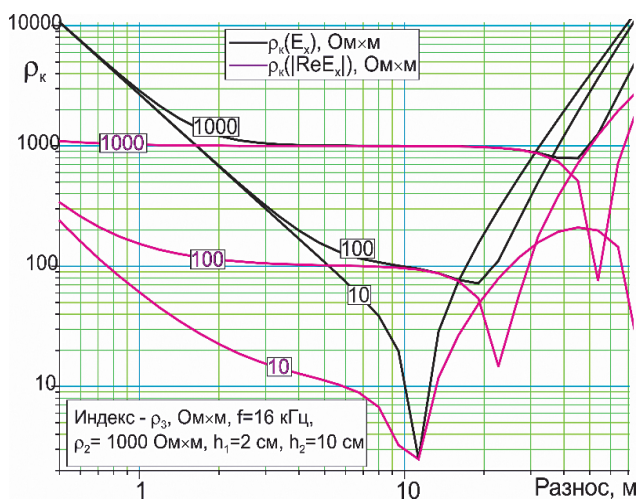


Рис. 4. Зависимости $\rho_k(E_x)$ и $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ от разноса x при нескольких значениях ρ_3
Fig. 4. Dependences of $\rho_k(E_x)$ and $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ on the spacing x for several values of ρ_3

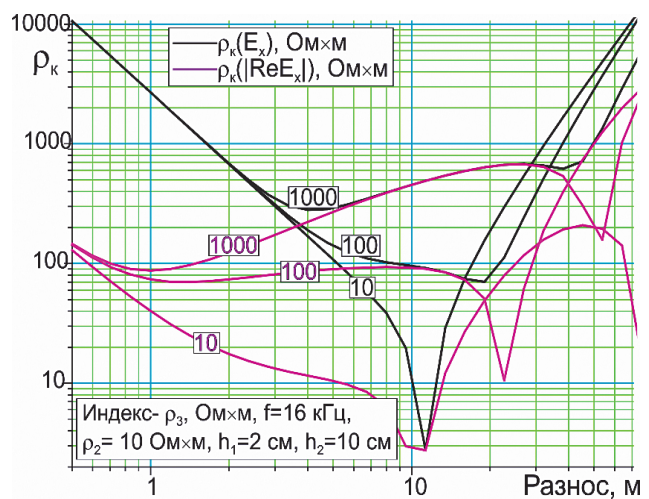


Рис. 5. Зависимости $\rho_k(E_x)$ и $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ от разноса x при нескольких значениях ρ_3
Fig. 5. Dependences of $\rho_k(E_x)$ and $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ on the spacing x for several values of ρ_3

в методе сопротивлений. Показано, что традиционный подход, основанный на использовании величины $|E_x|$, может приводить к значительным погрешностям при интерпретации данных, особенно на малых разносах, где доминирующее влияние оказывает поле зарядов на концах токовой линии, не зависящее от свойств среды.

Установлено, что использование реактивной составляющей поля позволяет исключить это влияние и получить более устойчивую связь между кажущимся и истинным удельным электрическим сопротивлением. Для двухслойной модели определен оптимальный диапазон разносов (около 8—10 м для частоты 16 кГц).

Для более сложной трехслойной модели показано, что наличие промежуточного слоя с высоким сопротивлением (типа асфальта) качественно эквивалентно увеличению высоты подъема установки, в то время как слой с низким сопротивлением (влажный грунт) существенно осложняет интерпретацию и определение параметров нижележащей толщи.

Таким образом, разработанный подход, основанный на измерении и анализе реактивной составляющей электрического поля, открывает перспективы для создания эффективной методики бесконтактной электроразведки, позволяющей проводить работы в условиях, исключающих или затрудняющих использование заземленных электродов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альпин Л.М., Даев Д.С., Каринский А.Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. Учебник для ВУЗов. Часть IV. М.: МГРИ, 2020. 104 с.
2. Груздев А.И., Бобачев А.А., Шевнин В.А. Определение области применения бесконтактной технологии метода сопротивлений. Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, издательство 2020. № 5. С. 100—106.
3. Заборовский А.И. Переменные электромагнитные поля в электроразведке. М.: Изд-во МГУ, 1960. 186 с.
4. Иванов А.А., Каринский А.Д. Способ бесконтактной электроразведки. Патент России № 2785037. 16.12.2022. Бюл. № 35.
5. Каринский А.Д., Шевнин В.А. Влияние индукции на результаты ВЭЗ на переменном токе. Геофизика. 2001. № 5. С. 50—56.
6. Каринский А.Д., Иванов А.А., Зуденков И.А., Матюшенко А.А., Новиков П.В. Обоснование новой методики при бесконтактных измерениях в электроразведке методом сопротивлений. Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration. 2023. № 4. С. 27—36. DOI: 10.32454/0016-7762-2023-65-4-27-36
7. Нахабцев А.С., Сапожников Б.Г., Яблучанский А.И. Электропрофилирование с незаземленными рабочими линиями. Л.: Недра. 1985. 96 с.
8. Тимофеев В.М., Бяшков Г.П. О некоторых путях повышения эффективности электропрофилирования при инженерно-геоэкологической съемке. Тр. ВСЕГИНГЕО. 1976. Т. 1. № 81. С. 28—36.
9. Трофимов И.В., Башкеев А.С., Савченко В.А., Коншин И.О. Опыт комплексирования бесконтактной технологии метода сопротивлений и геофизической съемки с применением беспилотных летательных аппаратов при поисках коренного золота в Бодайбинском синклинии. Науки о Земле и недрапользование. 2024. № 47(3). С. 248—261. DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-248-261

REFERENCES

1. Alpin L.M., Daev D.S., Karinskiy A.D. Theory of fields used in exploration geophysics. Textbook for universities. Vol. IV. Moscow: MGRI, 2020. 104 p. (In Russ.).
2. Gruzdev A.I., Bobachev A.A., Shevnin V.A. Determining the scope of non-contact technology of the resistance method. Bulletin of Moscow University. Series 4. Geology. 2020. Vol. 5. No. 5. P. 100—106 (In Russ.).
3. Zaborovskiy A.I. Variable electromagnetic fields in electrical exploration. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1960. 186 p. (In Russ.).
4. Ivanov A.A., Karinsky A.D. The method of non-contact electrical reconnaissance. Patent of Russia No. 2785037. 12/16/2022. Bull. No. 35 (In Russ.).
5. Karinskiy A.D., Shevnin V.A. Influence of induction on the results of VES on alternating current. Geophysics. 2001. Vol. 9. No. 5. P. 50—56 (In Russ.).
6. Karinskiy A.D., Ivanov A.A., Zudenkov I.A., Matyushenko A.A., Novikov P.V. Substantiation for a new non-contact measurement technique in electrical resistance surveys. Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration. 2023. No. 4. P. 27—36 (In Russ.). DOI: 10.32454/0016-7762-2023-65-4-27-36
7. Nakhabtsev A.S., Sapozhnikov B.G., Yabluchansky A.I. Electrical profiling with ungrounded working lines. Leningrad: Nedra, 1985. 96 p. (In Russ.).
8. Timofeev V.M., Byashkov G.P. On some ways to improve the efficiency of electrical profiling in engineering geocryological surveys. Tr. VSEGINGEO. 1976. V. 1. No. 81. P. 28—36 (In Russ.).
9. Trofimov I.V., Bashkeev A.S., Savchenko V.A., Konshin I.O. Integration experience of resistivity method contactless technology and unmanned aerial vehicle

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Каринский А.Д. — разработал концепции статьи, решение прямой задачи электродинамики, математическое моделирование, подготовил текст статьи, согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Иванов А.А. — внес вклад в разработку концепции статьи, подготовил текст статьи, проводил анализ результатов, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Ефимов Е.Д. — выполнил анализ литературных источников, тестирование алгоритмов решения прямой задачи электродинамики, оформление статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Зуденков И.А. — выполнил анализ литературных источников, оформление статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Alexandr D. Karinskiy — developed the article concept, solving a forward problem of electrodynamics, mathematical modeling, preparation of the text of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Andrey A. Ivanov — contributed to the development of the article concept, prepared the text, analyzed the results, approved the final version of the article and accepted responsibility for all aspects of the work.

Evgeniy D. Efimov — analysis of literary sources, testing of algorithms for solving the direct problem of electrodynamics, article formatting, final approval of the published version of the article, and acceptance of responsibility for all aspects of the work.

Ivan A. Zudenkov — analysis of literary sources, design of the article, approved the final version of the article and accepted responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Каринский Александр Дмитриевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: karinskyad@mgri.ru
SPIN-код: 1068-6325
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5155-6349>

Иванов Андрей Александрович* — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: biwolf@mail.ru
SPIN-код: 9977-2363
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5294-8878>

Alexandr D. Karinskiy — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Department of Geophysics of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: karinskyad@mgri.ru
SPIN-code: 1068-6325
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5155-6349>

Andrey A. Ivanov* — Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Assoc. Prof., Department of Geophysics of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: biwolf@mail.ru
SPIN-code: 9977-2363
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5294-8878>

Ефимов Евгений Дмитриевич — студент геофизического факультета Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

e-mail: evgentheterrible@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3583-0890>

Evgeniy D. Efimov — student of the Faculty of Geophysics of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: evgentheterrible@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3583-0890>

Зуденков Иван Андреевич — аспирант кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

e-mail: ivan.zoudenkov@gmail.com

SPIN-код: 9738-5580

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9261-3981>

Ivan A. Zudenkov — post-graduate researcher of the Department of Geophysics of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: ivan.zoudenkov@gmail.com

SPIN-code: 9738-5580

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9261-3981>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author