



ОБОСНОВАНИЕ НОВОЙ МЕТОДИКИ ПРИ БЕСКОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ В ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ

А.Д. КАРИНСКИЙ, А.А. ИВАНОВ*, И.А. ЗУДЕНКОВ, А.А. МАТЮШЕНКО, П.В. НОВИКОВ

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Методы сопротивлений — это электрическое зондирование и электропрофилирование с различными установками. Первоначально измерения проводили на постоянном токе, а затем на низкочастотном переменном токе. В случае постоянного тока единственные источники первичного электрического поля в этих методах — заряды токовых электродов A, B , а измеряемая величина — равное разности потенциалов ΔU_{MN} напряжение электрического поля E в линии MN с измерительными электродами M, N . По результатам измерений определяют (удобное для интерпретации результатов измерений) кажущееся удельное электрическое сопротивление ρ_k . Однако в ряде случаев, например при проведении измерений в районах многолетнемерзлых пород, бывает сложно обеспечить надежное заземление электродов. Поэтому полвека назад были начаты исследования с целью обоснования возможности бесконтактных измерений в методе электропрофилирования на переменном токе I в линии AB . До последнего времени методика бесконтактных измерений и интерпретации получаемых результатов опиралась на приближенные подходы, а не на «строгое» решение прямой задачи электродинамики.

Цель. Объективное обоснование методики бесконтактных измерений на основе решения прямой задачи электродинамики.

Материалы и методы. Метод исследования — математическое моделирование и анализ полученных результатов.

Результаты. Приведены результаты расчетов для модели, соответствующей возможным условиям при бесконтактных измерениях в электроразведке методом сопротивлений. Рассмотрен случай, когда генераторная линия AB гармонически меняющегося тока I расположена в воздухе, на высоте h над однородным проводящим полупространством с удельным электрическим сопротивлением ρ_2 .

Заключение. По сравнению с применяемой сейчас при бесконтактных измерениях методикой более эффективным для нахождения ρ_2 является определение кажущегося удельного электрического сопротивления по меняющейся синфазно с током I в генераторной линии AB реактивной составляющей напряжения электрического поля E в измерительной линии MN .

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., Зуденков И.А., Матюшенко А.А., Новиков П.В. Обоснование новой методики при бесконтактных измерениях в электроразведке методом сопротивлений. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2023;65(4):27—36. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-4-27-36>

Статья поступила в редакцию 30.05.23

Принята к публикации 22.09.2023

Опубликована 28.09.2023

* Автор, ответственный за переписку

SUBSTANTIATION FOR A NEW NON-CONTACT MEASUREMENT TECHNIQUE IN ELECTRICAL RESISTANCE SURVEYS

ALEXANDR D. KARINSKIY, ANDREY A. IVANOV*, IVAN A. ZUDENKOV, ANNA A. MATYUSHENKO,
PETR V. NOVIKOV

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

ABSTRACT

Background. Methods for electrical resistance surveys include those of electrical sounding and electrical profiling with various arrays. Measurements were originally carried out at direct current, although low-frequency alternating current was used later. In the case of direct current, the sole sources of the primary electric field in these methods comprise the charges of the A, B current electrodes, with the measured value being the electric field voltage E equal to the potential difference ΔU_{MN} in the MN line with the measuring electrodes M, N . According to the measurement results, the apparent electrical resistivity is determined, which is convenient for interpreting the measurement results ρ_a . However, in some cases, e.g., when conducting measurements in permafrost areas, it can be difficult to ensure reliable grounding of the electrodes. Therefore, half a century ago, research was initiated to substantiate the possibility of contactless measurements in the method of electrical profiling with the alternating current I in the AB line. Until recently, the technique of non-contact measurements and interpretation of the results obtained has been based on approximate approaches, rather than on a strict solution of the forward problem of electrodynamics.

Aim. Objective substantiation of the non-contact measurement technique based on the solution of a forward electrodynamics problem.

Materials and methods. The data obtained by mathematical simulation were analyzed.

Results. The results of calculations for a model corresponding to the possible conditions for contactless measurements in electrical exploration by the resistance method are presented. A case is considered when a generator line AB of a harmonically varying current I is located in the air, at a height h above a homogeneous conducting half-space with a specific electrical ρ_2 .

Conclusion. In comparison with the method currently used for non-contact measurements, it seems more effective to determine the apparent electrical resistivity from the reactive component of the electric field voltage E in the measuring line MN that varies in phase with the current I in the generator line AB .

Keywords: electrical resistance surveys, resistance method, non-contact measurements, forward problem, mathematical simulation

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

For citation: 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;65(4):27—36. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-4-27-36>

Manuscript received 30 May 2023

Accepted 22 September 2023

Published 28 September 2023

* Corresponding author

В семидесятых годах двадцатого века были начаты исследования с целью обоснования возможности применения бесконтактных измерений в электроразведке методом сопротивлений. Необходимость применения такой модификации

возникает в различных ситуациях. Например, при проведении измерений методами сопротивлений в зонах скальных или многолетнемерзлых пород при наличии снежного покрова либо практически непроводящих искусственных покрытий.

Кроме того, отсутствие необходимости заземления токовых (A, B) и измерительных (M, N) электродов позволяет многократно ускорить процесс измерений. Некоторые результаты таких исследований были опубликованы, например, в работах [2, 3, 12—16]. Однако теоретическое обоснование проведения бесконтактных измерений и интерпретации получаемых результатов в этих работах основывалось не на «строгом» решении соответствующей прямой задачи электродинамики, а на приближенных подходах. Причина этого, по-видимому, связана с тем, что некоторые трудности у авторов этих работ возникали при получении «строгого» решения соответствующей прямой задачи электродинамики и проведении на основе этого решения математического моделирования.

Очевидно, что проведение бесконтактных измерений в методах сопротивлений возможно лишь при переменном токе I в питающей линии AB . В случае постоянного тока I таким измерениям препятствует явление электростатической индукции. Некоторые результаты математического моделирования для электроразведки методами сопротивлений при переменном токе $I = I_0 \cos(2\pi ft) = I_0 \cos(\omega t)$ приведены в статье [7]. Здесь I_0 — амплитуда тока, f — частота, t — время, ω — круговая частота. В этой статье были приведены решение прямой задачи электродинамики и полученные на его основе результаты математического моделирования для случая, когда линия AB переменного тока лежит на поверхности «двухслойного» проводящего полупространства. Основой для получения решения задачи послужила методика, описанная в книге [5]. Эта же методика была применена нами при получении приведенных ниже результатов математического моделирования. Ранее результаты исследований по этой тематике были представлены на конференциях [8—11]. Был также получен патент [6].

Приведенные ниже результаты численных расчетов получены при частоте $f = 16$ кГц.

Это та рабочая частота, которая была выбрана для нескольких видов аппаратуры при бесконтактных измерениях в методах сопротивлений.

Модель и алгоритм

На рисунке 1 показана модель, для которой было получено решение прямой задачи электродинамики и проведены численные расчеты.

Горизонтальная плоскость S разделяет полупространства V_1 (воздух) и V_2 (приповерхностные горные породы). Генераторная (AB) и измерительная (MN) линии расположены в верхнем полупространстве на одной прямой, параллельной оси X , на высоте h над границей S . Решение соответствующей прямой задачи электродинамики приведено в электронной версии учебника [1]. При применении комплексной записи напряжение E_{MN} электрического поля E в измерительной линии MN определяет двойной интеграл (формула 1):

$$E_{MN} = \int_{x_M}^{x_N} \int_{x_B}^{x_A} E_x dx_q dx, \quad (1)$$

где $x_B \leq x_q \leq x_A$, $x_M \leq x \leq x_N$ (см. рис. 1).

Подынтегральная функция в формуле (1) — скалярная компонента E_x электрического поля E :

$$E_x = \int_0^\infty \{f_0 J_0[\Lambda \times (x - x_q)] + f_1 J_1[\Lambda \times (x - x_q)]\} d\Lambda, \quad (2)$$

которую определяет несобственный интеграл в смысле главного значения. В выражении (2) $J_0[\Lambda \times (x - x_q)]$, $J_1[\Lambda \times (x - x_q)]$ — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка аргумента $\Lambda \times (x - x_q)$, а множители f_0 и f_1 зависят от параметров показанной на рисунке 1 модели, от частоты f и от переменной интегрирования Λ . Для численного расчета несобственного интеграла в смысле главного значения в правой части формулы (2) мы пользовались преобразованием Эйлера. Применение этого преобразования описано в работе [4].

Приведенные на рисунках 2—4 результаты математического моделирования получены

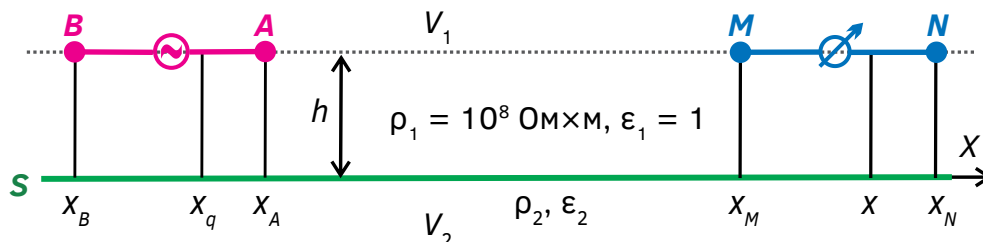


Рис. 1. Модель среды и электроразведочной установки

Fig. 1. Geoelectrical model and electrical array

для предельной дипольной осевой установки ($AB \rightarrow 0, MN \rightarrow 0$). Для такой установки напряжение E_{MN} пропорционально определяемой выражением (2) компоненте E_x поля $\mathbf{E}$ в центре отрезка MN . Значения кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k для такой установки определены двумя способами. Значения $\rho_k(E_x)$ для предельной дипольно-осевой установки определены традиционным способом по формуле: $\rho_k(E_x) = K \times |E_x|/I_0$, где $|E_x|$ — амплитуда компоненты E_x , $K = \pi \times x^3$ — коэффициент предельной дипольной осевой установки, расположенной на поверхности проводящего полупространства, а x — расстояние между центрами генераторного и измерительного диполей. Значения $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ определены по амплитуде $|\text{Re } E_x|$ реактивной составляющей $\text{Re } E_x$ компоненты E_x меняющейся синфазно либо в противофазе с током I в генераторном диполе AB . То есть $\rho_k(|\text{Re } E_x|) = K \times |\text{Re } E_x|/I_0$.

Результаты расчетов на рисунках 6 получены для приближающихся к реальным условиям при электроразведочных измерениях конечных расстояний между всеми электродами. Значения кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k на рисунке 6 определены двумя способами. При применяемом в настоящее время при бесконтактных измерениях подходе $\rho_k(E_{MN}) = K \times |E_{MN}|/I_0$, где $|E_{MN}|$ — амплитуда напряжения электрического поля в линии MN ,

$$K = \frac{2\pi}{1/AM + 1/BN - 1/AN - 1/BM} \text{ — коэффициент}$$

электроразведочной установки. При предлагаемом нами способе кажущееся удельное электрическое сопротивление $\rho_k(\text{Re } E_{MN}) = K \times |\text{Re } E_{MN}|/I_0$, где $|\text{Re } E_{MN}|$ — амплитуда реактивной составляющей напряжения E_{MN} электрического поля $\mathbf{E}$ в линии MN , меняющейся синфазно с током I в генераторной линии AB .

Результаты моделирования

На рисунке 2 представлены зависимости $\rho_k(E_x)$ от разнosa x . При расчетах в полупространстве V_2 была задана диэлектрическая проницаемость $\epsilon_2 = 10$. Хотя легко оценить, что при частоте 16 кГц и значениях ρ_2 менее первых десятков тысяч Ом·м выбор величины ϵ_2 несущественен, так как при любых, реальных для горных пород значениях ϵ_2 и при $\rho_2 < 10\,000$ Ом·м можно пренебречь влиянием на электромагнитное поле токов смещения в нижнем полупространстве.

Результаты моделирования, представленные на рисунке 2, показали, например, что при высоте

$h = 5$ см величина $\rho_k \approx \rho_2$, если разнос $x \approx 15$ м, а при $h = 10$ см величина $\rho_k \approx \rho_2$, если разнос $x \approx 20$ м. При $h = 20$ см значения ρ_k значительно больше ρ_2 при любых разнosaх x . Если $x > 25$ —30 м, то значения ρ_k перестают зависеть от h (индукционная асимптота).

На рисунке 3 показаны зависимости $\rho_k(E_x)$ от разнosa x при фиксированных высотах $h = 5$ см (а) и $h = 10$ см (б) и при трех значениях удельного электрического сопротивления ρ_2 . Из приведенных на этом рисунке результатов моделирования следует, что при частоте $f = 16$ кГц, указанных выше высотах h и разнosaх x порядка 10 и 20 метров величина $\rho_k \approx \rho_2$ только при высоких значениях ρ_2 (порядка 1000 Ом·м, как на рисунке 3 и выше).

Значения $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ на рисунке 4 определены по амплитуде $|\text{Re } E_x|$, составляющей $\text{Re } E_x$, меняющейся синфазно либо в противофазе, с током I в генераторном диполе AB . То есть $\rho_k(|\text{Re } E_x|) = K \times |\text{Re } E_x|/I_0$. Некоторые особенности графиков на этом рисунке связаны с тем, что функция $\text{Re } E_x(x)$ не является знакопостоянной. Результаты расчетов, представленные на рисунке 4а, получены при высоте $h = 5$ см, а на рисунке 4б — при $h = 10$ см.

При сравнении рисунка 4 с рисунками 2 и 3 видно, что определение по значению $|\text{Re } E_x|$ кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k при невысоких значениях ρ_2 может иметь безусловные преимущества по сравнению с применяемым сейчас определением ρ_k по величине $|E_x|$. В соответствии с результатами расчетов на рисунке 4 при заданной частоте f можно

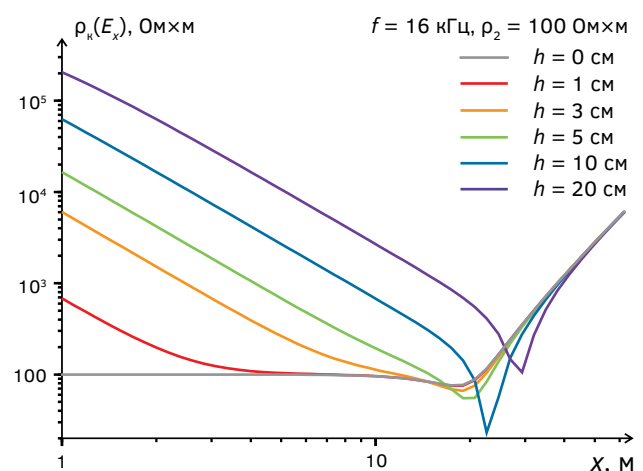


Рис. 2. Зависимости $\rho_k(E_x)$ от разнosa x при нескольких значениях высоты h
Fig. 2. Dependences of $\rho_k(E_x)$ on the spacing of x for several values of height h

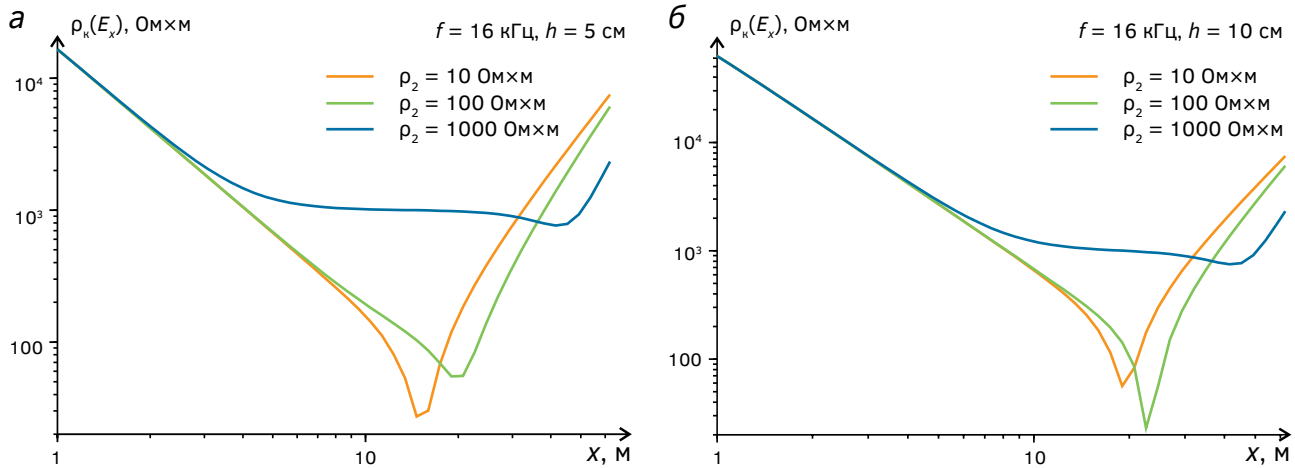


Рис. 3. Зависимости $\rho_k(E_x)$ от разнosa x при нескольких значениях ρ_2
Fig. 3. Dependences of $\rho_k(E_x)$ on the spacing of x for several values of ρ_2

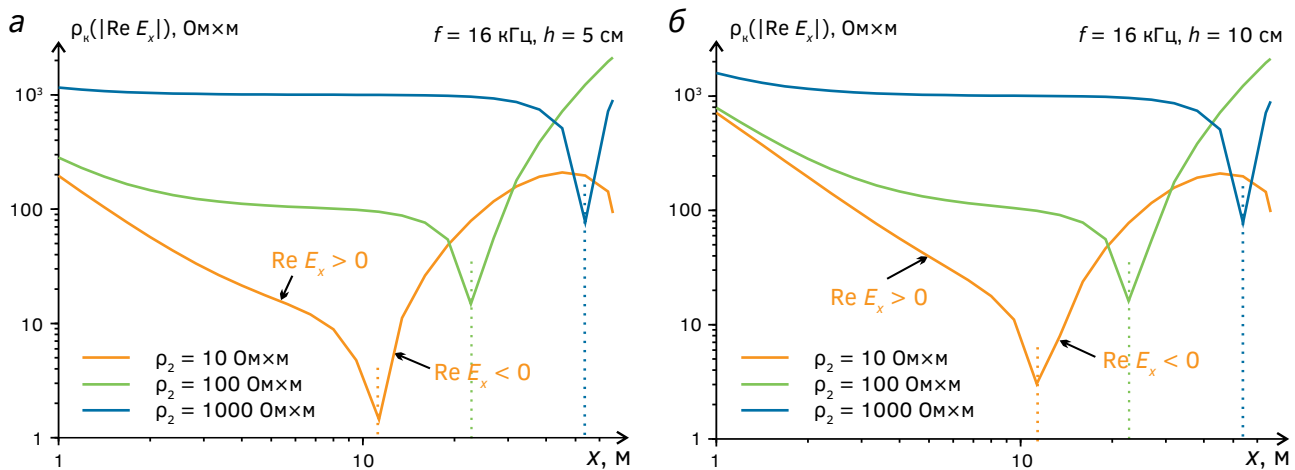


Рис. 4. Зависимости $\rho_k(\text{Re } E_x)$ от разнosa x при нескольких значениях ρ_2
Fig. 4. Dependences of $\rho_k(\text{Re } E_x)$ on the spacing of x for several values of ρ_2

выбрать такой разнос x , чтобы при широких пределах изменения удельного электрического сопротивления ρ_2 значения $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ были близки к ρ_2 . В пределах изменения ρ_2 от 10 до 1000 Ом·м таким оптимальным является разнос $x \approx 8\text{—}10$ м.

Таким образом, приведенные выше результаты численных расчетов показали, что при наиболее типичных для немерзлых осадочных горных пород удельных электрических сопротивлениях в случае бесконтактных измерений вместо амплитуды напряжения в линии MN целесообразно измерять реактивную составляющую этого напряжения, меняющуюся синфазно с током I в линии AB . Попробуем теперь дать этому физическое истолкование.

Пусть горизонтальный переменный электрический диполь AB с центром в начале декартовых

координат расположен в воздухе на высоте h над плоской горизонтальной границей S однородного проводящего немагнитного полупространства с удельным электрическим сопротивлением ρ_2 . В этом случае электрическое поле с напряженностью $\mathbf{E}$ создают следующие четыре возбудителя: 1) электрические заряды на концах отрезка AB , величины которых не зависят от ρ_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 и токами смещения. В ближней зоне такая составляющая поля переменного электрического диполя не зависит от электрических параметров среды (см. [1]); 4) Кулоново (гальваническое) поле $\mathbf{E}$, создаваемое поверхностными

зарядами с поверхностной плотностью σ , индуцированными на границе S , которое зависит от коэффициента контрастности границы S , и, следовательно, именно эта составляющая поля $\mathbf{E}$ зависит от удельного электрического сопротивления ρ_2 проводящего полупространства.

Если ось Z направлена по нормали к плоскости S , то поверхностная плотность зарядов $\sigma = \epsilon_0 \times \Delta E_z$, где ϵ_0 — электрическая постоянная, а ΔE_z — разрыв на этой плоскости нормальной к Sz компоненты электрического поля $\mathbf{E}$. Сразу отметим, что в случае гармонически меняющегося поля плотность σ имеет две составляющие: реактивную

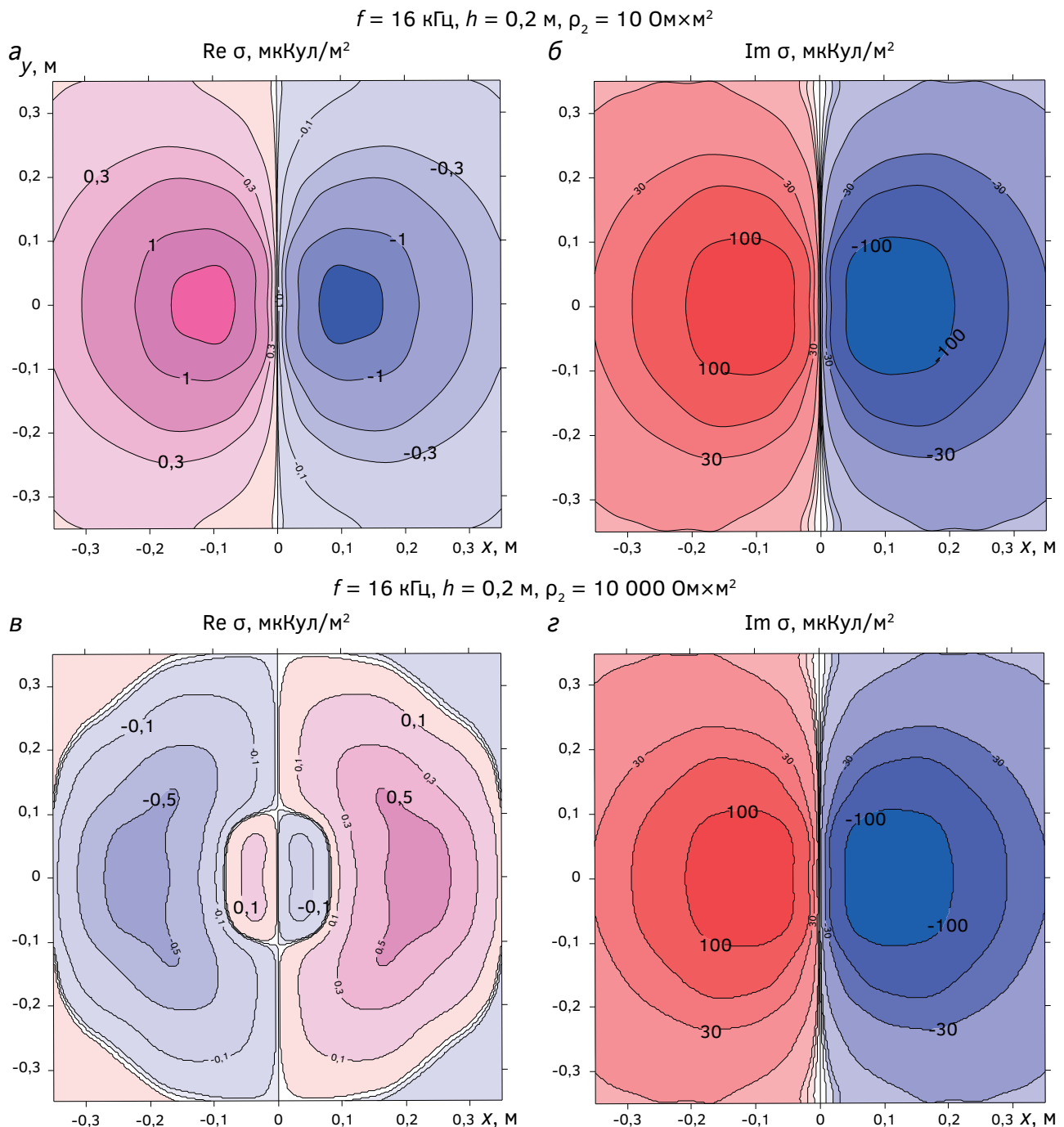


Рис. 5. Распределение плотностей зарядов $\text{Re } s$ и $\text{Im } s$ на плоскости S
Fig. 5. Distribution of charge densities $\text{Re } s$ and $\text{Im } s$ on the S plane

Re σ , меняющуюся синфазно либо в противофазе с током I , и активную Im σ , отличающуюся по фазе от тока I на $\pm\pi/2$ радиан. Заряды с этими плотностями — источники, соответственно, реактивной и активной составляющих поля $\mathbf{E}$.

На рисунке 5 показаны примеры того, как могут быть распределены плотности зарядов Re σ и Im σ на участке плоскости S при высоте $h = 20$ см и двух разных значениях ρ_2 . На верхних рисунках (а, б) $\rho_2 = 10$ Ом·м, а на нижних рисунках (в, г) $\rho_2 = 10\,000$ Ом·м. Слева, на рисунках а, в, показаны карты Re σ , а справа, на рисунках б, г — карты Im σ .

При сравнении рисунков а, в видим, что распределение на плоскости S составляющей Re σ , а следовательно, и создаваемое этими зарядами поле Re $\mathbf{E}$ существенно зависит от величины ρ_2 . Значения Im σ на рисунках б, г по абсолютной величине примерно на два порядка выше абсолютных величин |Re σ |, но карты Im σ на этих рисунках практически одинаковы. То есть интересующий нас (искомый) параметр ρ_2 почти не влияет на плотность Im σ и на создаваемое этими зарядами поле Im $\mathbf{E}$, а также на суммарное поле $\mathbf{E}$. Удельное электрическое сопротивление ρ_2 влияет на плотность Re σ и, следовательно, на поле Re $\mathbf{E}$.

Графики на рисунках 2—4 и карты на рисунке 5 получены при разnose $AB \rightarrow 0$. Ниже будут представлены результаты математического моделирования для дипольной осевой установки (ДООУ) для приближающихся к реальным условиям при электроразведочных измерениях конечных расстояниях между всеми электродами.

На рисунке 6 при нескольких значениях ρ_2 представлены зависимости кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k от высоты h для установки В2А6М2N. То есть расстояния между (точечными) электродами В и А, а также между электродами М и N равны 2 метрам, а расстояние между электродами А и М равно 6 метрам (см. рис. 1). Сплошными линиями показаны зависимости $\rho_k(E_{MN})$ от h , где E_{MN} — амплитуда напряжения поля $\mathbf{E}$ в линии MN. Видим, что эти значения в той или иной степени позволяют оценить истинное удельное электрическое сопротивление ρ_2 проводящего полупространства только при высотах h , равных первым единицам сантиметров, особенно при невысоких значениях ρ_2 . При тех пределах изменения ρ_2 , при которых выполнены расчеты, и при высотах h более 8 сантиметров значения $\rho_k(E_{MN})$ практически не зависят от ρ_2 .

Штрихпунктирными линиями показаны зависимости $\rho_k(\text{Re } E_{MN})$ от h . Из полученных результатов

численных расчетов следует, что даже при высотах h в десятки сантиметров величины $\rho_k(\text{Re } E_{MN})$ испытывают значительное влияние ρ_2 .

Заключение

Очевидно, что определение ρ_k по реактивной составляющей Re E_{MN} напряжения E_{MN} может позволить значительно расширить область применения бесконтактной модификации электроразведки методом сопротивлений.

По рассмотренной в этой работе проблематике дальнейшие исследования, по нашему мнению, следует провести по следующим направлениям:

- 1) Получение в аналитическом виде решения соответствующей прямой задачи электродинамики для модели среды с двумя плоскопараллельными границами. Составление соответствующих такой модели программ для компьютера и проведение численных расчетов;
- 2) Проведение физического моделирования с соблюдением принципов геометрического и электродинамического подобия с измерением реактивной компоненты Re E_{MN} ;
- 3) Создание габаритного макета аппаратуры позволяющего измерять Re E_{MN} и проведение измерений с этим макетом.

Полученные авторами результаты математического моделирования могут послужить основой при конструировании серийной аппаратуры для бесконтактных измерений в методе электропрофилирования, обоснования методики измерений и интерпретации результатов измерений.

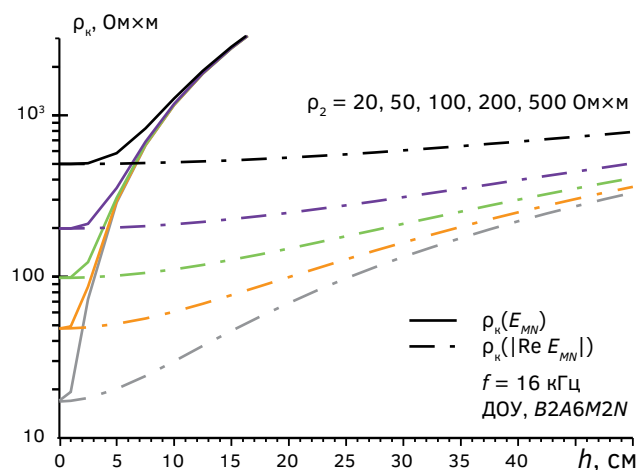


Рис. 6. Зависимости $\rho_k(E_{MN})$ и $\rho_k(\text{Re } E_{MN})$ от высоты h при нескольких значениях ρ_2
 Fig. 6. Dependencies $\rho_k(E_{MN})$ and $\rho_k(\text{Re } E_{MN})$ from the height h at several values ρ_2

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. Сравнение различных методик контактных и бесконтактных измерений в условиях средней полосы России // Инженерные изыскания. 2014. Т. 7. №9/10. С. 32—37.
3. Груздев А. И., Бобачев А. А., Шевнин В. А. Определение области применения бесконтактной технологии метода сопротивлений // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2020. Т. 5. № 5, С. 100—106.
4. Дашевский Ю. А. Применение преобразования Эйлера для расчета стационарных и гармонических электромагнитных полей в горизонтально-слоистых средах. Электромагнитные методы геофизических исследований. / Под ред. Ю. Н. Антонова. Новосибирск, 1982. С. 78—88.
5. Заборовский А. И. Переменные электромагнитные поля в электроразведке. М.: Изд-во МГУ, 1960. 186 с.
6. Иванов А. А., Каринский А. Д. Способ бесконтактной электроразведки. Патент России № 2785037. 16.12.2022. Бюл. № 35.
7. Каринский А. Д., Шевнин В. А. Влияние индукции на результаты ВЭЗ на переменном токе. // Геофизика. 2001. Т. 9. № 5. С. 50—56.
8. Каринский А. Д., Кудина Я. О., Матюшенко А. А. К бесконтактной модификации электроразведки методом сопротивлений // Разведочная геофизика и геоинформатика: мат-лы Всеросс. науч.-практич. конф. М.: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2021. С. 28—33.
9. Каринский А. Д., Кудина Я. О., Матюшенко А. А. Бесконтактные измерения в электроразведке методом сопротивлений; опыт математического моделирования // Новые идеи в науках о Земле: мат-лы XV Междунар. науч.-практич. конф. Т. IV. М.: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2021. С. 298—302.
10. Каринский А. Д., Шевнин В. А., Иванов А. А. Бесконтактные измерения в электроразведке методом сопротивлений; опыт математического моделирования // Мат-лы VIII Всеросс. школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна. М.: Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 2021. С. 279—283.
11. Каринский А. Д., Кудина Я. О., Матюшенко А. А. К обоснованию методики бесконтактных измерений в электроразведке методом сопротивлений // Разведочная геофизика и геоинформатика: мат-лы Всеросс. науч.-практич. конф. М.: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2022. С. 9—12.
12. Нахабцев А. С., Сапожников Б. Г., Яблчанский А. И. Электропрофилирование с незаземленными рабочими линиями. Л.: Недра. 1985. 96 с.
13. Тимофеев В. М., Бяшков Г. П. О некоторых путях повышения эффективности электропрофилирования при инженерно-геокриологической съемке // Тр. ВСЕГИНГЕО. 1976. Т. 1. № 81. С. 28—36.
14. Calvert H. T. Capacitive-coupled resistivity survey of ice-bearing sediments, Mackenzie Delta // SEG technical program expanded abstracts. 2002. V. 1. No. 1. P. 696—698.
15. Grard R., Tabbagh A. A mobile four-electrode array and its application to the electrical survey of planetary grounds at shallow depths // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. No. B3. P. 4117—4123.
16. Kuras O., Beamish D., Meldrum P. I., Ogilvi R. D. Fundamentals of the capacitive resistivity technique // Geophysics. 2006. V. 71. No. 3. P. G135—G152.

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 Russian).
2. Gruzdev A. I. Comparison of various methods of contact and non-contact measurements in the conditions of central Russia // Engineering survey. 2014. Vol. 7. No. 9/10. P. 32—37 (In Russian).
3. 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 Russian).
4. Dashevskiy Yu. A. Application of the Euler transform to calculate stationary and harmonic electromagnetic fields in horizontally layered media // Electromagnetic methods of geophysical research. / Ed. Yu. N. Antonov. Novosibirsk, 1982. P. 78—88.
5. Zaborovskiy A. I. Заборовский А. И. Variable electromagnetic fields in electrical exploration. Moscow: Publishing House of Moscow State University. 1960. 186 p. (In Russian).
6. Ivanov A. A., Karinsky A. D. The method of non-contact electrical reconnaissance // Patent of Russia No. 2785037. 12/16/2022. Bull. No. 35.
7. Karinskiy A. D., Shevnin V. A. Influence of induction on the results of VES on alternating current // Geophysics. 2001. V. 9. No. 5. P. 50—56 (In Russian).
8. Karinskiy A. D., Kudina Ya. O., Matyushenko A. A. Toward a non-contact modification of electrical prospecting by the resistance method // Exploration geophysics and geoinformatics. Materials of the All-Russian scientific-practical conference. Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, 2021. P. 28—33 (In Russian).

9. Karinskiy A.D., Kudina Ya.O., Matyushenko A.A. Non-contact measurements in electrical prospecting by the method of resistance; experience in mathematical modeling // *New ideas in the Earth sciences: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference. Volume IV.* Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, 2021. P. 298—302 (In Russian).
10. Karinskiy A.D. Shevnin V.A., Ivanov A.A. Non-contact measurements in electrical prospecting by the method of resistance; experience in mathematical modeling // *Materials of the VIII All-Russian school-seminar on electromagnetic sounding of the Earth named after M.N. Berdichevsky and L.L. Vanyan.* Moscow: Institute of Physics of the Earth. O.Yu. Schmidt RAN, 2021. P. 279—283.
11. Karinskiy A.D., Kudina Ya.O., Matyushenko A.A. To substantiate the methodology of contactless measurements in electrical exploration by the method of resistances // *Exploration geophysics and geoinformatics. Materials of the All-Russian scientific-practical conference.* Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, 2022. P. 349—352.
12. Nakhbhtsev A.S., Sapozhnikov B.G., Yabluchansky A.I. Electrical profiling with ungrounded working lines. Leningrad: Nedra, 1985. 96 p.
13. 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.
14. Calvert H.T. Capacitive-coupled resistivity survey of ice-bearing sediments, Mackenzie Delta // *SEG technical program expanded abstracts.* 2002. Vol. 1. No. 1. P. 696—698.
15. Grard R., Tabbagh A. A mobile four-electrode array and its application to the electrical survey of planetary grounds at shallow depths // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. No. B3. P. 4117—4123.
16. Kuras O., Beamish D., Meldrum P.I., Ogilvi R.D. Fundamentals of the capacitive resistivity technique // *Geophysics.* 2006. Vol. 71. No. 3. P. G135—G152.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Каринский А.Д. — разработка концепции статьи, решение прямой задачи электродинамики, математическое моделирование, подготовка текста 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 работ.

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

Матюшенко А.А. — внесла вклад в разработку концепции статьи, подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Новиков П.В. — внес вклад в разработку концепции статьи, добавил и отредактировал текст 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 the 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 the responsibility for all aspects of the work.

Anna A. Matyushenko — contributed to the development of the article concept, prepared the text, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Petr V. Novikov — contributed to the development of the article concept, added and edited the text, approved the final version of the article and accepted the 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>

Alexandr D. Karinskiy — Dr. of 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>

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>

Andrey A. Ivanov* — Cand. of 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>

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>

Матюшенко Анна Алексеевна — аспирант кафедры математики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: matiushenkoaa@mgri.ru
SPIN-код: 3402-3319
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2911-6133>

Anna A. Matyushenko — post-graduate researcher of the Department of Mathematics of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: matiushenkoaa@mgri.ru
SPIN-code: 3402-3319
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2911-6133>

Новиков Петр Вячеславович — кандидат технических наук, доцент кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: novikovpv@mgri.ru
SPIN-код: 9977-2363
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5119-5813>

Petr V. Novikov — Cand. of Sci. (Tech.), Assoc. Prof., Department of Geophysics of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: novikovpv@mgri.ru
SPIN-code: 9977-2363
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5119-5813>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author