

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ
GEOPHYSICAL METHODS OF PROSPECTING AND EXPLORATION

УДК: 550.837.75

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ПРОСТРАНСТВА,
ВЛИЯЮЩИХ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОВОЛНОВОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ

А.Д. КАРИНСКИЙ¹, Н.М. КУЗНЕЦОВ²

*¹ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., Москва 117997, Россия
email: akarinski@mail.ru*

*²ООО «Радионда»
а/я 44, Москва 121614, Россия
email: n.kuznetsov@radionda.ru*

Известно, что в изоляторе областью, оказывающей основное влияние на распространение электромагнитных волн, является половина первой зоны Френеля. Но горные породы — проводящая среда. Приведены примеры результатов расчётов, иллюстрирующие, какая область проводящего пространства может оказать существенное влияние на результаты метода радиоволнового просвечивания. При применённом подходе каждый элемент ΔV_i проводящего пространства, отличающийся электрическими параметрами от всех других элементов, служит источником вторичного электромагнитного поля, подобного полю переменного электрического диполя. Результаты математического моделирования позволяют определить, какая область проводящей среды при тех или иных условиях оказывает основное влияние на результаты радиоволнового просвечивания.

К л ю ч е в ы е с л о в а: радиоволновое просвечивание; проводящая среда; влияние областей пространства.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-3-72-76

DEFINITION OF THE AREAS OF SPACE AFFECTING RESULTS
OF THE RADIO-WAVE METHOD

A.D. KARINSKIY¹, N.M. KUZNETSOV²

*¹Russian State Geological Prospecting University
23, Miklouho-Maklay's street, Moscow 117997, Russia
email: akarinski@mail.ru*

*²Radionda LTD
Post office box 44, Moscow 121614, Russia
email: n.kuznetsov@radionda.ru*

It is known that in the insulator the area that has the main influence on the propagation of electromagnetic waves, is determined by the radius of the first Fresnel zone. But rocks are conductive medium. Examples of the results of calculations have been given, illustrating which area of the conducting space can have a significant impact on the re-

sults of the radio-wave method. In the given approach, each element ΔV_i of a conducting space, differing in electrical parameters from all other elements, is a source of a secondary electromagnetic field, similar to the field of an alternating electric dipole. The results of mathematical modeling can help to determine which area of the conducting medium under certain conditions has the main influence on the results of radio wave method. Simulation results can determine which region of the conductive medium has a major influence on the results of radio-wave method.

К е у в о р д: radio-wave method; conductive medium; influence of areas of space.

В соответствии с принципом Гюйгенса—Френеля каждую точку пространства, охваченного волновым процессом, можно рассматривать как источник вторичных волн. Математическое обоснование этому дают формулы Кирхгофа и Пуассона. Но такой подход обоснован для случая распространения электромагнитного (ЭМ) поля в изоляторе, либо поля упругих смещений в абсолютно упругой среде, когда поля распространяются без затухания и в однородных областях среды удовлетворяют волновым уравнениям.

Если названные поля меняются со временем гармонически, с частотой f , то их компоненты удовлетворяют уравнению Гельмгольца с действительным волновым числом k . В этом случае для определения области пространства, оказывающей существенное влияние на распространение поля от его точечного стороннего возбудителя T до точки наблюдения (приёмника) r , удобно воспользоваться представлениями о зонах Френеля. На рис. 1 показано сечение зон Френеля плоскостью рисунка, проходящей через точки T и r . Центральная область синего цвета соответствует 1-й зоне Френеля V_1 , а её ограниченная штриховой линией часть $V_{1/2}$ (половина первой зоны Френеля) — область, существенно влияющая на распространение волн от точки T к точке r . Вкладами источников вторичных волн, расположенных вне области $V_{1/2}$, в поле в точке r можно пренебречь.

Метод радиоволнового просвечивания (РВП) основан на изучении прохождения радиоволн через горные породы. Метод РВП начали применять в разведочной геофизике в первой половине прошлого века в основном с целью обнаружения и локализации хорошо проводящих тел с низким удельным электрическим сопротивлением и соответственно большим коэффициентом поглощения ЭМ волн [6].

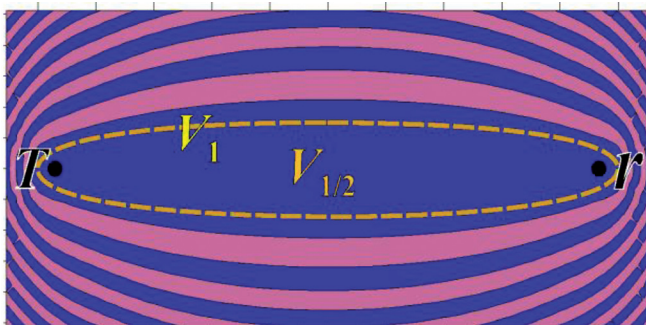


Рис 1. Сечения первой зоны Френеля V_1 и области $V_{1/2}$, оказывающей существенное влияние на распространение волн

При РВП волны распространяются не в изоляторе, а в проводящей среде и подвержены затуханию. В однородных областях такой среды компоненты ЭМ поля удовлетворяют телеграфным уравнениям, а для гармонически меняющихся полей — уравнениям Гельмгольца с комплексным волновым числом $k = a + i \cdot b$. На характеристики высокочастотного ЭМ поля оказывают влияние диэлектрическая проницаемость ϵ и удельное электрическое сопротивление ρ . От этих параметров и от частоты f зависят волновое число, длина волны $\lambda = 2\pi/a$, глубина проникновения $\delta = 1/b$ и отношение амплитуд соответствующих компонент векторов плотности токов смещения и плотности токов проводимости ($j^{\text{см}}/j$).

В [1] дано обоснование применению оригинального подхода к определению областей пространства, влияющих на результаты некоторых геофизических методов. Показано, что влияние на поле каждого малого элемента ΔV_i , отличающегося по электрическим параметрам от вмещающей среды, идентично влиянию постоянного или переменного электрического диполя. Достоверность получаемых на основе этого подхода данных подтверждено, в частности, сравнение полученных нами результатов расчётов для электроразведки методом сопротивлений с данными, полученными другими способами и опубликованными в зарубежных научных изданиях, например, в [8, 9]. Позже результаты исследований по этой тематике для некоторых методов электроразведки (СЭП, ВЭЗ, СГ и др.) были представлены в [2–4].

В настоящей работе приведены примеры результатов математического моделирования, иллюстрирующие то, какая область проводящего пространства может оказывать основное влияние на результаты радиоволнового просвечивания. Для моделирования послужили алгоритмы и программы для численных расчётов на основе приближённого решения прямой задачи электродинамики для модели, показанной на рис. 2. Векторы E^n , H^n — электрическая и магнитная составляющие первичного ЭМ поля — поля в безграничной однородной среде. Обычно обусловленное наличием имеющего форму шара объекта ΔV_i вторичное поле может быть выражено в виде бесконечных рядов, члены которых содержат сферические функции Бесселя и другие специальные функции [7]. Но для случая, когда первичное ЭМ поле однородно в пределах объекта ΔV_i и при достаточно малых размерах ΔV_i , точнее при условии $|k_e| \cdot R_{\text{ш}} \ll 1$ (рис. 2), обуслов-

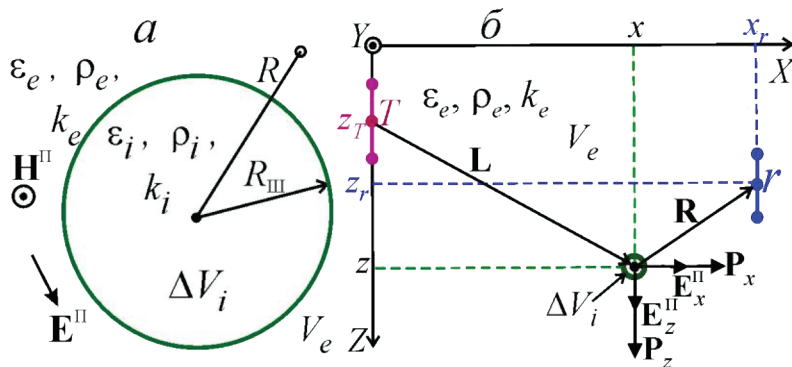


Рис 2. Объект ΔV_i в форме шара в первичном электромагнитном поле (а); генераторная (Т) и измерительная (r) антенны и компоненты дипольного момента элемента ΔV_i (б)

ленное присутствием объекта вторичное поле удалось выразить в виде элементарной функции — суммы полей гармонически меняющихся с частотой f электрических диполей с моментами P_x, P_y, P_z пропорциональными соответствующим компонентам электрической составляющей E^{Π} первичного ЭМ поля, создаваемого генераторной антенной Т. Моменты эти зависят от компонент поля E^{Π} , частоты f , параметров объекта ΔV_i и вмещающей его среды в области V_e .

На рис. 3 приведены примеры результатов расчётов, полученных на основе применённого нами

подхода. Генераторная (Т) и измерительная (r) антенны лежат в плоскости $y = 0$. Показаны результаты расчётов для нескольких плоскостей $y/\lambda_e = \text{const}$, где λ_e — длина волны в области пространства V_e . Значения x, y, z — координаты центров малых объектов ΔV_i . Оттенкам красного и синего цветов на рис. 3 соответствуют случаи, когда присутствие ΔV_i приводит соответственно к увеличению или уменьшению напряжения суммарного электрического поля в измерительной антенне r по сравнению с напряжением первичного поля (поля в отсутствие ΔV_i).

Результаты расчётов (рис. 3) получены при частоте $f = 3$ МГц и следующих электрических параметрах области V_e : $\epsilon_e = 5$, $\rho_e = 1000$ Ом·м. При этих значениях длина волны $\lambda_e \approx 39,5$ м, глубина проникновения $\delta_e \approx 13,4$ м, а отношение амплитуд плотности токов смещения и плотности токов проводимости (j^{cm}/j) $\approx 0,833$, т. е. это отношение близко к единице (j^{cm}/j). Заметим, что в изоляторе отношение (j^{cm}/j) было бы бесконечно велико, так как в этом случае $j = 0$. Электрические параметры элемента ΔV_i : $\rho_i = 10$ Ом·м, $\epsilon_i = 81$.

Случаю, в котором в области V_e отношение j^{cm}/j соизмеримо с единицей, отвечает распространение

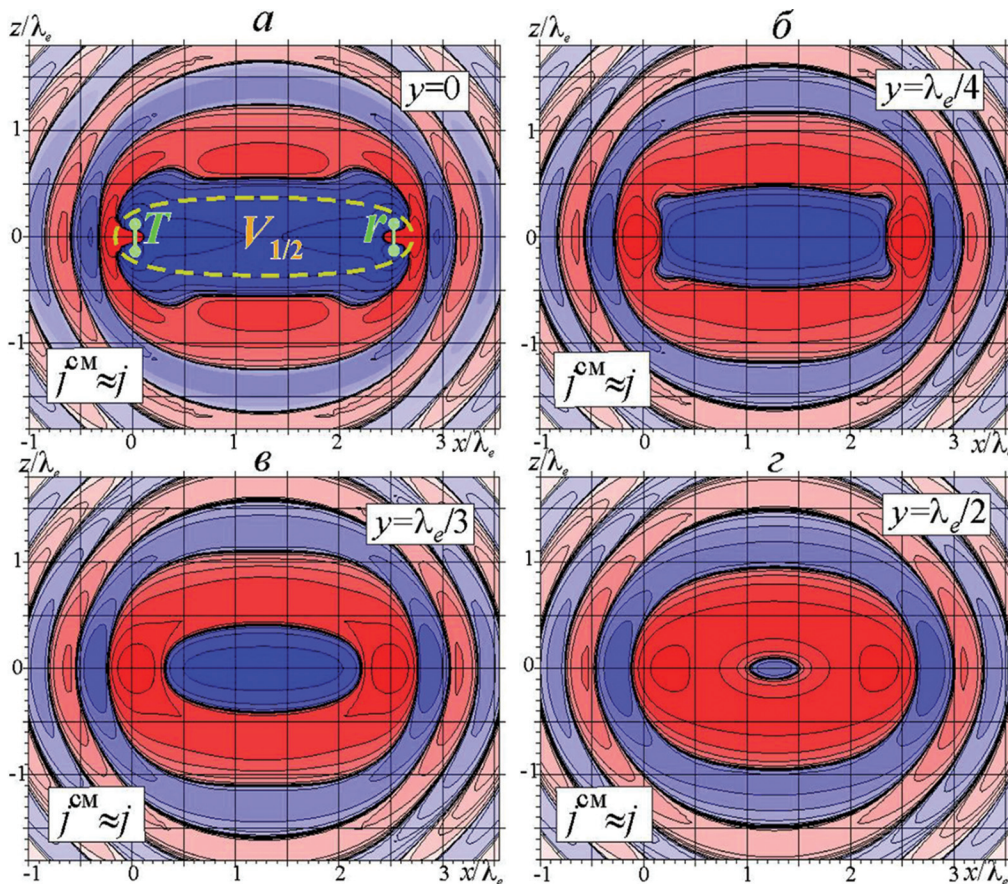


Рис. 3. Влияние малых объектов ΔV_i на напряжение в измерительной антенне при j^{cm}/j

затухающей ЭМ волны, что, судя по результатам моделирования на рис. 3, позволяет на основе численных расчётов воспользоваться понятием области $V_{1/2}$, оказывающей существенное влияние на распространение волн от генераторной антенны T к измерительной антенне r в методе РВП. Показанная на рис. 3, a синим цветом центральная часть плоскости $y = 0$ — это некоторый аналог сечения такой плоскостью первой зоны Френеля. Штриховой линией на этом рисунке ограничено сечение области $V_{1/2}$, аналога половины первой зоны Френеля — области, оказывающей существенное влияние на распространение ЭМ волн в изоляторе.

Понятно, что при других значениях частоты f , электрических параметров ε_e , ρ_e , ε_i , ρ_i , а также при иных размерах и взаимном положении генераторной и измерительной антенн будет другой и область $V_{1/2}$, оказывающая существенное влияние на результаты радиоволнового просвечивания. В случаях, когда во вмещающей изучаемые объекты среде отношение j^{cm}/j соизмеримо с единицей, или значительно превосходит единицу, на основе разработанного подхода не сложно установить, какова эта область $V_{1/2}$ в каждом конкретном случае.

Но при решении при помощи радиоволнового просвечивания некоторых задач ЭМ поле во вмещающей изучаемые объекты проводящей среде может быть квазистационарным. Это означает, что в такой среде справедливо неравенство $j^{cm} \ll j$. На рис. 4 приведены результаты моделирования для случая, когда во вмещающей малые объекты ΔV_i

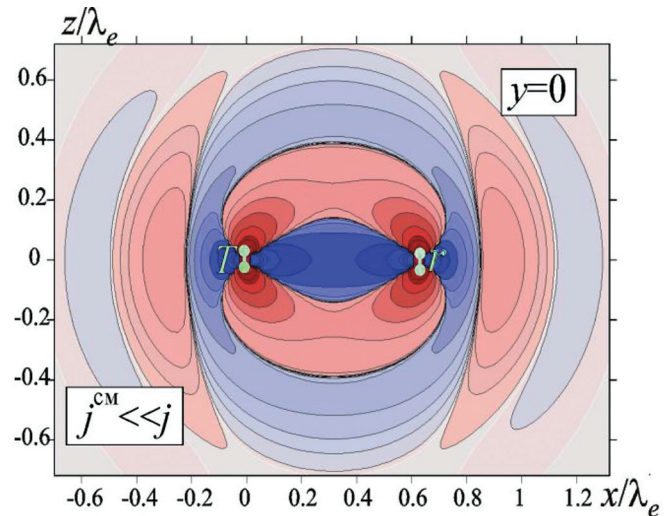


Рис. 4. Влияние малых объектов ΔV_i на напряжение в измерительной антенне при $j^{cm} \ll j$

среде (см. рис. 2) амплитуда плотности тока смещения $j^{cm} \ll j$, т. е. в области V_e гармонически меняющееся ЭМ поле — квазистационарное и говорить о распространении такого поля в «строгом» смысле этого термина не приходится. Как видно на рис. 4, при $j^{cm} \ll j$ нет подобного половине первой зоны Френеля аналога области $V_{1/2}$, оказывающей основное влияние на распространение волн. В этом случае нужны иные подходы для определения областей пространства, оказывающих основное влияние на результаты радиоволнового просвечивания. Одна из современных методик интерпретации результатов РВП рассмотрена в [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Каринский А.Д., Даев Д.С. Об областях пространства, существенно влияющих на результаты измерений в электромагнитных методах // «Геофизика». Научно-технический журнал. ЕАГО. 2012. № 6. С. 42–53.
2. Каринский А.Д., Даев Д.С., Мазитова И.К. Математическое моделирование С-эффекта и Р-эффекта в методах сопротивлений электроразведки // «Геофизика». Научно-технический журнал ЕАГО. 2014. № 1. С. 36–45.
3. Каринский А.Д., Даев Д.С., Мазитова И.К., Юдин М.Н. Математическое моделирование влияния локальных объектов на результаты методов сопротивлений электроразведки // Международная научно-практическая конференция «Теория и практика разведочной и промышленной геофизики», г. Пермь, 24–26 ноября 2016 г. Сборник научных трудов. Пермь. 2016. С. 122–126.
4. Каринский А.Д., Даев Д.С. Влияние локальных объектов на результаты электроразведки методом сопротивлений; опыт математического моделирования // «Геофизика». Научно-технический журнал. ЕАГО. 2017. № 1. С. 35–44.
5. Кузнецов Н.М. Способ 3D обработки данных радиоволнового просвечивания межскважинного пространства // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 1. В. № 19. С. 240–246.
6. Петровский А.А., Достовалов Б.Н. Первые опыты просвечивания вечной мерзлоты электромагнитными волнами // Труды института мерзлотоведения АН СССР. 1947. Т. 5. С. 121–160.
7. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: Изд-во ЛКИ. 2008. 656 с.
8. Locke M.H. and Dahlin T.A. comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion // Journal of Applied Geophysics. 2002. 49. P. 149–162.
9. Mc Gillivray P.R. and Oldenburg D.W. Methods for calculating Fréchet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: a comparative study // Geophysical Prospecting. 1990. 38. P. 499–524.

REFERENCES

1. Karinskiy A.D., Dayev D.S. Ob oblastiakh prostranstva, sushchestvenno vliyayushchikh na rezul'taty izmereniy v elektromagnitnykh metodakh. [Karinskiy A.D., Dayev D.S. About determination the area of space, significantly influencing on measurement's results in electromagnetic methods of geophysics] *The Russian Geophysics Journal*, 2012, issue 6, pp. 42–53. (In Russian).
2. Karinskiy A.D., Dayev D.S., Mazitova I.K. Matematicheskoye modelirovaniye S-effekta i R-effekta v metodakh soprotivleniy elektrozvedki. [Karinskiy A.D., Dayev D.S., Mazitova I.K. Mathematical modeling C-effect and P-effect in the methods of apparent resistance in electrical survey]. *The Russian Geophysics Journal*, 2014, issue 1, pp. 36–45. (In Russian)
3. Karinskiy A.D., Dayev D.S., Mazitova I.K., Yudin M.N. Matematicheskoye modelirovaniye vliyaniya lokal'nykh ob'yektov na rezul'taty metodov soprotivleniy elektrozvedki. *Sbornik nauchnykh trudov*, pp. 122–126. [Karinskiy A.D., Dayev D.S., Mazitova I.K., Yudin M.N. Mathematical modeling of the local

- objects influence on the results of the methods of aparent resistance in electrical survey. [*Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Teoriya i praktika razvedochnoy i promyslovoy geofiziki», g. Perm', 24–26 noyabrya 2016 g.*] *Theory and practice of exploration and petroleum geophysics. Collection of scientific papers*. Perm, 2016, pp. 122–126. (In Russian)
4. Karinskiy A.D., Dayev D.S. Vliyaniye lokal'nykh ob"yektov na rezul'taty elektrorazvedki metodom soprotivleniy; opyt matematicheskogo modelirovaniya [Karinskiy A.D., Daev D.S. Influence of local objects on the resistivity method results; experience of mathematical modeling] [*«Geofizika». Nauchno-tehnicheskij zhurnal*. YEAGO, 2017, no 1, pp. 35–44. *The Russian Geophysics Journal*, 2017, issue 1, pp. 35–44]. (In Russian).
 5. Kuznetsov N.M. Sposob 3D obrabotki dannykh radiovolnovogo prosvechivaniya mezhskvazhinnogo prostranstva. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2012, no 1, vypusk N 19, S. 240–246. [Kuznetsov N. M. Method for 3D data processing of radio wave scandling of the interwell space. *Bulletin KRAUNZ. Earth Sciences*, 2012, no. 1, Issue no. 19, pp. 240–246]. (In Russian)
 6. Petrovskiy A.A., Dostovalov B.N. Pervyye opyty prosvechivaniya vechnoy merzloty elektromagnitnymi volnami. (*Trudy instituta merzlotovedeniya AN SSSR*. 1947. T. 5. S. 121–160). [Petrovskiy A.A., Dostovalov B.N. The first experiments of permafrost scanning by electromagnetic waves. *Proceedings of the Institute of Permafrost of the Academy of Sciences of the USSR*, 1947, V. 5, pp. 121–160]. (In Russian)
 7. Svetov B.S. *Osnovy geoelektriki*. [Svetov B.S. Geoelectrics basics. M., Publisher LKI, 2008, 656 p. (In Russian)]
 8. Loke M.H. and Dahlin T.A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 2002, 49, pp. 149–162.
 9. McGillivray P.R. and Oldenburg D.W. Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: a comparative study. *Geophysical Prospecting*, 1990, 38, pp. 499–524.
-