



## НОРМАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЛИНИИ АВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА; К ПРИМЕНЕНИЮ БПЛА В ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ

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

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Приведены результаты математического моделирования для случая, когда заданным возбудителем поля служит лежащая на горизонтальной границе проводящего полупространства линия гармонически меняющегося с частотой  $f$  электрического тока. Вычисляемыми величинами являются характеристики вертикальной компоненты  $H_z$  переменного магнитного поля в воздухе. Основой для моделирования послужило решение соответствующей прямой задачи электродинамики.

**Цель.** Обоснование возможной методики измерений в электроразведке при применении беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

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

**Результаты.** Получены результаты расчетов для модели, соответствующей случаю, когда заземленная генераторная линия АВ гармонически меняющегося тока  $I$  лежит на горизонтальной границе проводящего полупространства с удельным электрическим сопротивлением  $\rho_2$ , а расположенный в воздухе магнитно-индукционный датчик перемещается на значительной высоте  $h$  над этой границей.

**Заключение.** Результаты моделирования показали, какие характеристики магнитного поля наиболее «чувствительны» к значениям  $\rho_2$ . Таковыми являются активная составляющая компоненты  $H_z$ , отличающаяся по фазе от тока  $I$  на  $\pm\pi/2$ , и начальная фаза этой компоненты.

**Ключевые слова:** электроразведка, беспилотные летательные аппараты, 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., Ефимов Е.Д. Нормальное магнитное поле линии АВ переменного тока; к применению БПЛА в электроразведке. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(3):100—106. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-3-100-106>

Статья поступила в редакцию 03.06.2024

Принята к публикации 12.09.2024

Опубликована 30.09.2024

\* Автор, ответственный за переписку

# APPLICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN ELECTROMAGNETIC SURVEY: NORMAL MAGNETIC FIELD ALONG AB LINE OF ALTERNATING CURRENT

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

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

## ABSTRACT

**Background.** The present study introduces the results of mathematical modeling for the scenario when a line of harmonically varying current at frequency  $f$  serves as a specified field source, positioned along a horizontal boundary of a conductive half-space. The computed parameters pertain to the characteristics of the vertical component  $H_z$  of the alternating magnetic field in the air. The modeling is based on the solution of the corresponding direct problem in electrodynamics.

**Aim.** To justify a potential methodology for measurements in electromagnetic survey utilizing unmanned aerial vehicles (UAVs).

**Materials and methods.** The study involves mathematical modeling and analysis of the obtained results.

**Results.** The calculation results were obtained for a model corresponding to the scenario when a grounded generator line  $AB$  carrying a harmonically varying current  $I$  is positioned along a horizontal boundary of a conductive half-space with specific electrical resistance  $\rho_2$ , and a magnetic induction sensor located in the air is moving at a considerable height  $h$  above this boundary.

**Conclusion.** The results of the modeling indicate the most “sensitive” characteristics of the magnetic field to the values of  $\rho_2$ , namely, the active component of  $H_z$ , which differs in phase from the current  $I$  by  $\pm\pi/2$ , and the initial phase of this component.

**Keywords:** electromagnetic survey, unmanned aerial vehicles, direct problem solution, mathematical modeling

**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., Efimov E.D. Application of unmanned aerial vehicles in electromagnetic survey: Normal magnetic field along AB line of alternating current. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(3):100—106. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-3-100-106>

*Manuscript received 03 June 2024*

*Accepted 12 September 2024*

*Published 30 September 2024*

\* Corresponding author

В последнее время было опубликовано много работ, связанных с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в электроразведке. Некоторые результаты исследований по этой тематике приведены, например, в работах [2, 3, 7]. Значительная часть этих работ посвящена применению БПЛА в методе переходных процессов (МПП). Но, как видно из результатов измерений, приведенных, например, в работе [3], при «открытом измерительном канале» в методе МПП весьма значительное влияние

на результаты таких измерений оказывают помехи. Вместе с тем при проведении измерений на фиксированных частотах для увеличения соотношения «полезный сигнал — помеха» несложно применить фильтрацию.

## Модель и алгоритм

Ниже приведены результаты математического моделирования для следующих условий. На рисунке 1 показана линия  $AB$  гармонически меняющегося со временем электрического тока

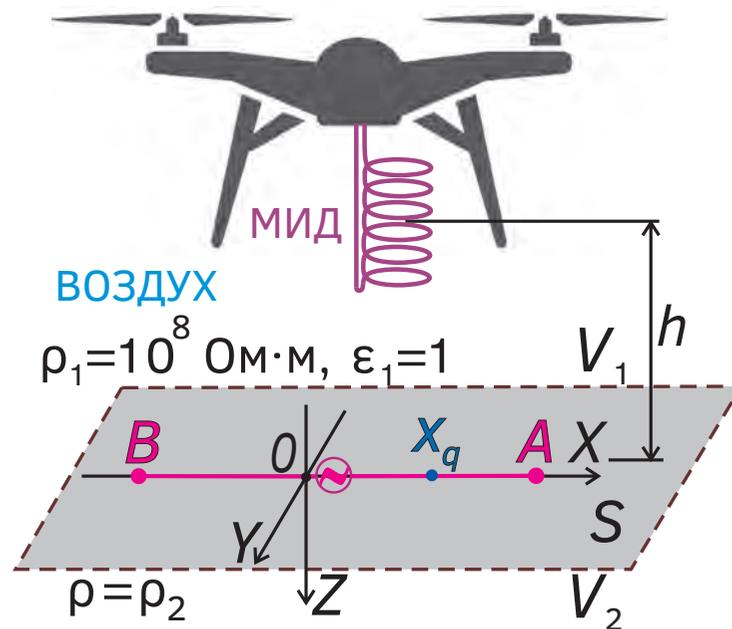


Рис. 1. Модель среды и электроразведочной установки  
 Fig. 1. Geoelectrical model and electrical array

$I = I_0 \times \cos(2\pi ft) = I_0 \times \cos(\omega t)$  с заземленными токовыми электродами  $A, B$ . Здесь  $I_0$  — амплитуда тока,  $f$  — частота,  $t$  — время,  $\omega$  — круговая частота. Линия  $AB$  лежит на границе  $S$  однородного нижнего проводящего полупространства  $V_2$  с удельным электрическим сопротивлением  $\rho_2$  и верхнего полупространства  $V_1$  (воздух). Электроды  $A, B$  лежат на оси  $X$  декартовых координат, их координаты:  $x_A = AB/2$  и  $x_B = -AB/2$ . Ось  $Z$  ортогональна плоскости  $S$  и направлена в полупространство  $V_2$ .

В электроразведке для определения компонент переменного магнитного поля служат определенным образом ориентированные магнитноиндуктивные датчики (МИД) (см. рис. 1). Вычисляемыми при моделировании величинами были характеристики вертикальной компоненты  $H_z$  магнитного поля  $H$  на высоте  $h$  над границей  $S$ . Это — амплитуда меняющейся синфазно либо в противофазе с током  $I$  реактивной составляющей  $\text{Re } Hz$ , амплитуда отличающейся по фазе на  $\pm\pi/2$  от тока  $I$  активной составляющей  $\text{Im } Hz$ , амплитуда  $|Hz| = [(\text{Re } Hz)^2 + (\text{Im } Hz)^2]^{1/2}$  компоненты  $H_z$  и начальная фаза  $\phi_{Hz}$  этой компоненты.

Основной целью моделирования было выяснить, какие из этих характеристик наиболее «чувствительны» к удельному электрическому сопротивлению  $\rho_2$  проводящего полупространства.

Основой при математическом моделировании послужило решение прямой задачи о поле горизонтального элементарного отрезка  $dl$  гармонически меняющегося тока  $I$  (переменного горизонтального электрического диполя) в присутствии горизонтальной границы  $S$ . Возможный подход к решению такой задачи был описан в [5], а ее решение есть в [1]. Впервые полученные на основе этого решения прямой задачи результаты математического моделирования для электрической составляющей электромагнитного поля и кажущегося удельного сопротивления приведены в [6].

Для описанной выше модели в верхнем полупространстве  $V_1$  вертикальную компоненту  $H_z^{(1)}$  магнитного поля заземленной линии  $AB$  гармонически меняющегося тока  $I$  по отрезку  $(x_B, x_A)$  оси  $X$  определяет двойной интеграл, причем интеграл по  $\Lambda$  — несобственный интеграл в смысле главного значения:

$$H_z^{(1)} = \frac{I \cdot y}{4\pi} \int_{x_B}^{x_A} \left\{ \frac{1}{r} \int_0^\infty \frac{\Lambda^2}{\Lambda_1} [\exp(-\Lambda_1 \times |z|) + B_1 \exp(-\Lambda_1 \times z)] J_1(\Lambda \times r) d\Lambda \right\} dx_q,$$

где  $r = \sqrt{(x - x_q)^2 + y^2}$ ,  $B_1 = \frac{\Lambda_1 - \Lambda_2}{\Lambda_1 + \Lambda_2} \cdot \exp(-2\Lambda_1 \times h)$ ,  $\Lambda_{1,2} = \sqrt{\Lambda^2 - k_{1,2}^2}$ ,  $k_1$  и  $k_2$  — волновые

числа в верхнем и нижнем полупространствах,  $x, y, z = -h$  — координаты точки наблюдения (центра МИД), а  $J_1(\lambda \times r)$  — функция Бесселя первого рода первого порядка аргумента  $\lambda \times r$ . При вычислении несобственного интеграла в смысле главного значения было применено преобразование Эйлера.

На рисунке 2а показана карта реактивной составляющей  $Re Hz$  (при высоте  $h = 10$  м и частоте  $f = 10$  кГц). Как было бы и в случае постоянного тока  $I$  в линии АВ, над осью  $X$ , на которой лежит линия АВ, компонента  $Re Hz$  меняет знак, а абсолютная величина  $|Re Hz|$  убывает с удалением от линии АВ. Карта активной составляющей  $Im Hz$  компоненты  $H_z$  приведена на рисунке 2б. При сравнении этих карт видим, что при заданной

при расчетах частоте при небольших величинах  $|y|$  значения  $|Re Hz|$  примерно на порядок выше величин  $|Im Hz|$ . Но при больших расстояниях  $|y|$ , наоборот,  $|Im Hz| \gg |Re Hz|$ .

Но в какой степени величины  $|Re Hz|$  и  $|Im Hz|$  зависят от значений удельного электрического сопротивления  $\rho_2$ , которые в первую очередь в рамках показанной на рисунке 1 модели могут быть искомыми при интерпретации результатов измерений?

На рисунках 3а, б приведены зависимости от координаты  $y$  амплитуд составляющих  $Re Hz$  и  $Im Hz$  при  $x = 0$  и  $z = -h$ . То есть это графики по «профилю», ортогональному токовой линии АВ и «проходящему» на высоте  $h$  над центром этой линии при нескольких значениях удельного электрического сопротивления  $\rho_2$ .

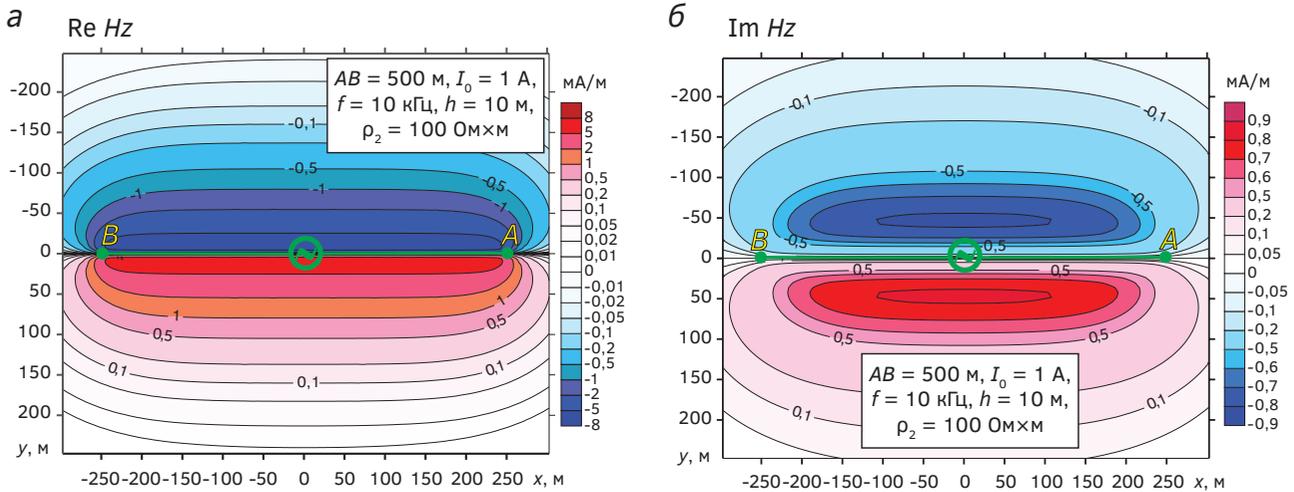


Рис. 2. Карты составляющих  $Re Hz$  и  $Im Hz$  в плоскости  $z = -h$   
 Fig. 2. Maps of components  $Re Hz$  and  $Im Hz$  in the  $z = -h$  plane

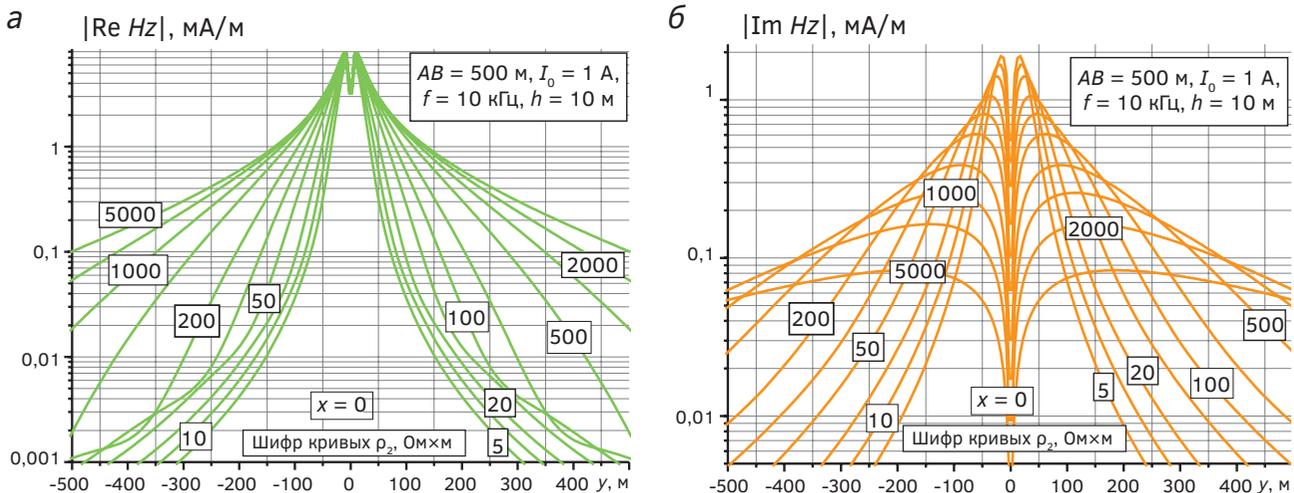


Рис. 3. Зависимости  $|Re Hz|$  и  $|Im Hz|$  от  $y$  при  $x = 0, z = -h$   
 Fig. 3. Dependencies  $|Re Hz|$  and  $|Im Hz|$  from  $y$  at  $x = 0, z = -h$

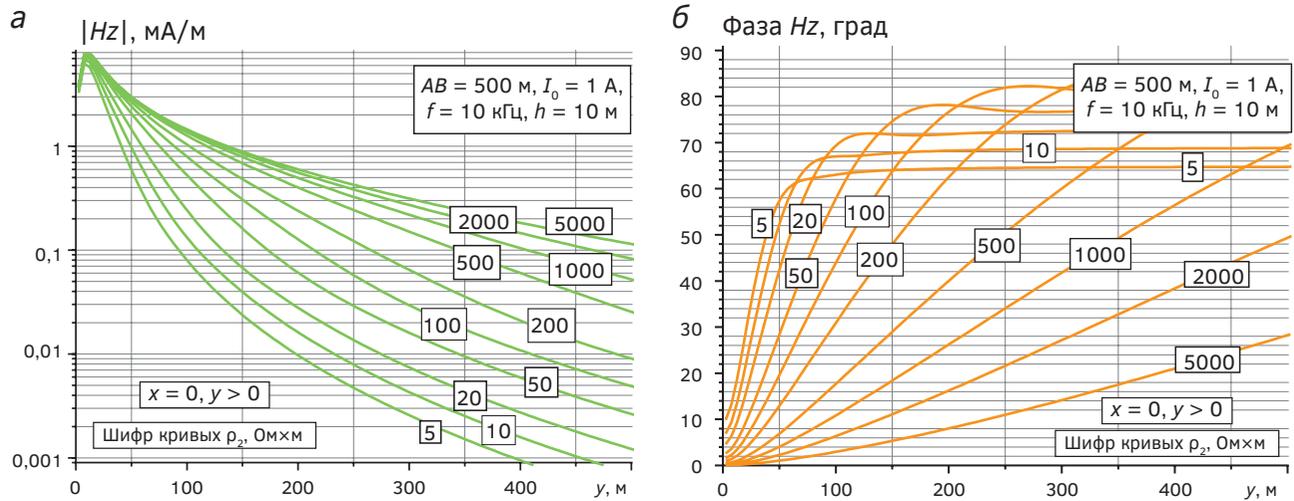


Рис. 4. Зависимости  $|Hz|$  и  $\phi_{Hz}$  от  $y$  при  $x = 0, z = -h$   
 Fig. 4. Dependencies  $|Hz|$  and  $\phi_{Hz}$  from  $y$  at  $x=0, z=-h$

На рисунке 3а видим, что при заданных частоте  $f$  и параметрах модели значения  $\rho_2$  оказывают значительное влияние на величину  $|Re Hz|$  при  $|y| \gg h$  и в пределах изменения значений  $\rho_2$  от 100 до 1000 Ом·м. Из приведенных на рисунке 3б результатов моделирования следует, что при широких пределах изменения  $\rho_2$  (от 5 до 5000 Ом·м) значения  $|Im Hz|$ , а также особенности конфигурации графиков  $|Im Hz|(y)$  существенно зависят от удельного электрического сопротивления  $\rho_2$ .

На рисунках 4а, б приведены зависимости от у амплитуды  $|Hz| = [(Re Hz)^2 + (Im Hz)^2]^{1/2}$  и начальной фазы  $\phi_{Hz}$  компоненты  $Hz$  при  $y > 0$ . Видим, что при высоких удельных электрических сопротивлениях  $\rho_2$  значения  $\phi_{Hz}$  в большей степени, чем  $|Hz|$ , зависят от величины  $\rho_2$ . Например, при  $y = 300$  м и увеличении значения  $\rho_2$  с 1000 до 5000 Ом·м величина  $|Hz|$  меняется в узких пределах — от 0,22 до 0,31 мА/м. При этих же условиях начальная фаза  $\phi_{Hz}$  уменьшается с  $42^\circ$  до  $14^\circ$ .

### Заключение

Очевидно, что определение  $\rho_k$  по реактивной составляющей  $Re E_{MN}$  напряжения  $E_{MN}$  может позволить значительно расширить область

применения бесконтактной модификации электроразведки методом сопротивлений. Из полученных результатов моделирования следует, что при возбуждении гармонически меняющегося электромагнитного поля заземленной линией  $AB$  электрического тока  $I$  наиболее «чувствительными» к удельному электрическому сопротивлению  $\rho_2$  проводящего полупространства в условиях применения БПЛА являются активная составляющая  $Im Hz$  и начальная фаза  $\phi_{Hz}$  вертикальной компоненты магнитного поля в воздухе. Хотя, по-видимому, проще проводить измерения величины  $|Hz|$ .

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

- 1) разработка алгоритмов и проведение численных расчетов для 3D-моделей среды при условиях, когда на характеристики переменного магнитного поля в воздухе оказывают влияние приповерхностные локальные объекты, отличающиеся от вмещающей эти объекты среды по удельному электрическому сопротивлению;
- 2) проведение физического моделирования с измерением различных составляющих переменного магнитного поля в воздухе.

### 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. Давыденко С.Ю., Терёшкин С.А., Давыденко А.Ю., Снопков С.В., Паршин А.В., Давыденко Ю.А. Применение БПЛА и наземных геофизических методов при изучении древнего металлургического комплекса на участке Барун-Хал II (Западное Прибайкалье). Геоархеология и археологическая минералогия. Т. 8. Миасс: ИМин УрО РАН, 2021. С. 35—40.
3. Давыденко Ю.А., Башкеев А.С., Яковлев С.В., Шкиря М.С., Бухалов С.В., Крайнова Е.А., Шарлов М.В.,

- Паршин А.В., Персова М.Г. Первые результаты тестирования технологии БПЛА-МПП на Байкале. *Материалы VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна, Москва, 04—07 октября 2021 года.* — Москва: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2021. — С. 52—58.
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. Каринский А.Д., Шевнин В.А. Влияние индукции на результаты ВЭЗ на переменном токе. *Геофизика.* 2001. № 5. С. 50—56.
  7. Паршин А.В. Способ аэроэлектроразведки с применением легкого беспилотного летательного аппарата. Патент RU 2736956 C1, 2020 г.
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. Davydenko S.Yu., Tereshkin S.A., Davydenko A. Yu., Snopkov S.V., Parshin A.V., Davydenko Yu.A. Application of UAVs and ground-based geophysical methods in the study of the ancient metallurgical complex at the Barun-Khal II site (Western Baikal region). *Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy.* T. 8. Miass: Institute of Mining Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021. P. 35—40 (In Russ.).
3. Davydenko Yu.A., Bashkeev A.S., Yakovlev S.V., Shkirya M.S., Bukhalov S.V., Krainova E.A., Sharlov M.V., Parshin A.V., Persova M. G. First results of UAV-MPP technology testing at Baikal. *Materials of the VIII All-Russian School-seminar on electromagnetic sounding of the Earth named after M.N. Berdichevsky and L.L. Vanian, Moscow, October 04—07, 2021.* — Moscow: O.Y. Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 2021. — pp. 52—58. (In Russ.).
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. Variable electromagnetic fields in electrical exploration. Moscow: Moscow State University Publ., 1960. 186 p. (In Russ.).
6. 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 Russ.).
7. RU patent No. 2736956, 11/23/2020 Parshin A.V. Method of airborne electrical prospecting using a light unmanned aerial vehicle. Patent of Russia No. 2736956. 12/16/2022. Bull. No. 33.

## REFERENCES

## ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Каринский А.Д. — разработал концепцию статьи, решил прямую задачу электродинамики, провел 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 работ.

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

Ефимов Е.Д. — внес вклад в разработку концепции статьи, подготовил 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 direct 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.

Evgeniy D. Efimov — 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.

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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:ivan.zoudenkov@gmail.com)  
SPIN-code: 9738-5580  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9261-3981>

**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](mailto: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](mailto:evgentheterrible@inbox.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3583-0890>

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author