

DOI 10.34926/geo.2023.65.43.010

УДК 550.837.21

## АНАЛИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ, РАСЧИТАННЫХ ДЛЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ПРИПОВЕРХНОСТНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

М.А. Суконкин, П.Ю. Пушкарев

Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. 119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

**Аннотация.** Представлена типичная геоэлектрическая модель литосферы, содержащая трехслойный фоновый разрез и проводящий грабен в кровле фундамента, и рассмотрены два ее варианта – с однородным верхним слоем и с множеством приповерхностных неоднородностей в этом слое. С использованием синтетических магнитотеллурических данных, рассчитанных для этих вариантов модели, мы анализируем влияние приповерхностных неоднородностей на низкочастотные данные. Исследуются кривые зондирования и частотные разрезы кажущегося сопротивления, а также карты основных инвариантных параметров магнитотеллурических матриц: тензора импеданса, матрицы Визе – Паркинсона, горизонтального магнитного тензора и теллурического тензора. Представленные магнитотеллурические данные будут в дальнейшем использоваться для оценки эффективности различных методов подавления приповерхностных искажений.

**Ключевые слова.** Магнитотеллурические зондирования, приповерхностные неоднородности, статические смещения, синтетические данные.

## ANALYSIS OF SYNTHETIC MAGNETOTELLURIC DATA, CALCULATED FOR A RESISTIVITY MODEL WITH NEAR-SURFACE INHOMOGENEITIES

M.A. Sukonkin, P.Yu. Pushkarev

Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University. 1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119234

**Abstract.** A typical resistivity model of the lithosphere is presented, containing a three-layer background section and a conductive graben in the top of the basement, and two variants of it are considered: with a homogeneous upper layer and with many near-surface inhomogeneities in this layer. Using synthetic magnetotelluric data calculated for these model variants, we analyze the effect of near-surface inhomogeneities on low-frequency data. Sounding curves and apparent resistivity pseudo-sections are studied, as well as maps of the main invariant parameters of magnetotelluric matrices: the impedance tensor, the Wiese-Parkinson matrix, the horizontal magnetic tensor, and the telluric tensor. The presented magnetotelluric data will be further used to evaluate the effectiveness of various methods for suppressing near-surface distortions.

**Key words.** Magnetotelluric surveys, near-surface distortions, static shift, synthetic data.

### Введение

Во многих глубинных геофизических методах верхняя часть разреза представляет собой проблемную зону, порождающую искажения получаемых данных. Магнитотеллурические (МТ) исследования не являются исключением. При использовании низких частот, когда глубина проникновения поля много больше размеров неоднородностей верхней части разреза, существует связанное с ними аномальное электрическое поле. Оно пропорционально нормальному полю и обладает той же фазой и частотной зависимостью. Наблюдаемая разность потенциалов между измерительными электродами искажается, имеет место статический сдвиг кривой кажущегося сопротивления, при этом фазовые кривые остаются неискаженными [Jones, 1988].

В случае если МТ-данные осложнены аномалиями от приповерхностных неоднородностей (ППН), формальное решение обратной задачи может привести к получению искаженных геоэлектрических моделей [Berdichevskiy, Dmitriev, 1976]. Для того чтобы уменьшить влияние таких искажений, реализуются три этапа:

- распознавание приповерхностных эффектов;
- подавление аномалий от ППН;
- решение обратной задачи с использованием скорректированных данных.

Для подавления влияния ППН применяют различные методы коррекции статических смещений. Они включают методы нормализации кривых МТЗ с помощью пространственной фильтрации или с привлечением данных других геофизических методов (например, ЗСБ или ГИС), а также методы декомпозиции тензора импеданса, позволяющие разделить региональные и локальные эффекты [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Удобным способом оценки эффективности методов подавления влияния ППН является использование синтетических данных, то есть рассчитанных для известной геоэлектрической модели. В данной статье представлен первый необходимый этап работы в этом направлении. Мы рассмотрим трехмерную геоэлектрическую модель в двух вариантах: без ППН и осложненную ППН. И проанализируем проявление влияния ППН в синтетических МТ-данных, представленных в виде характеристик, обычно используемых для анализа и интерпретации. Специальные методы подавления влияния ППН в этой статье мы рассматривать не будем.

### Геоэлектрическая модель

Геоэлектрическая модель включает в себя глубинный фоновый слоистый разрез, глубинную трехмерную неоднородность, а также приповерхностный слой. В первом варианте модели этот слой является

однородным, а во втором варианте он содержит в себе множество трехмерных ППН. Фоновый разрез состоит из трех слоев, имитирующих проводящий осадочный чехол, высокоомную литосферу и проводящую мантию. Глубинная неоднородность представляет собой проводящую вставку, имитирующую грабен под осадочным чехлом (рис. 1).

Для создания глубинной модели мы использовали программу 2D-моделирования IGF\_MT2D [Новожицкий и Пушкарев, 2001], обладающую удобным интерфейсом для построения геоэлектрических моделей, а затем вручную ограничили грабен по простиранию и превратили модель в трехмерную.

Начальная 2D-модель состоит из 59 горизонтальных и 42 вертикальных ячеек. По горизонтали размер ячеек меняется от 0,5 км в центральной части модели до 64 км у боковых границ области моделирования. Размеры ячеек по вертикали увеличиваются от 10 м у поверхности до 50 км в глубинной части области моделирования. Фоновый разрез состоит из трех слоев: осадочного – до глубины 1 км с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) 10 Ом·м; литосферы – до 40 км с УЭС 1000 Ом·м; верхней мантии с УЭС 100 Ом·м. В верхней части второго слоя расположен грабен шириной 7 км (14 ячеек) и мощностью 2 км (рис. 1).

Из программы IGF\_MT2D модель среды была экспортирована в файл формата программы 3D-моделирования MT3DFwd [Mackie and Madden, 1997], при этом сетка по оси простирания Y была сформирована такая же, как по оси X. Таким образом, сетка для 3D-модели составила 59 ячеек по осям X и Y, а также 42 ячейки по оси Z. Модель была вручную скорректирована так, чтобы грабен в плане стал прямоугольным, состоящим из 14 ячеек по оси X (7 км) и 21 ячейки по оси Y (10,5 км), как показано на рис. 2.

Для оценки приповерхностных искажений, помимо варианта модели с однородным верхним слоем, был создан вариант с ППН, распределение которых отображено на рис. 2. Эти неоднородности были помещены в две верхние ячейки модели высотой 10 и 15 м, то есть в слой мощностью 25 м. Значения УЭС неоднородностей варьируются от 1 до 100 Ом·м (рис. 2) при фоновом УЭС верхнего слоя 10 Ом·м.

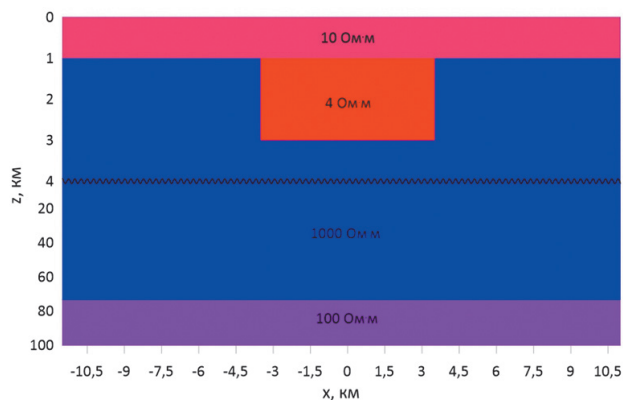


Рис. 1  
Разрез геоэлектрической модели

Для добавления слоя с ППН в геоэлектрическую модель была применена программа GMC (Geophysical Models Creator), написанная нами в системе MATLAB. При этом в качестве входных для нее использовались файл с 3D-моделью в формате программы MT3DFwd и файл с картой значений УЭС верхнего неоднородного слоя. В последнем файле также указываются размеры этого слоя и число ячеек по вертикали, которое он занимает. В нашем случае карта представляет собой квадрат 22,5 на 22,5 км (45 × 45 ячеек), слой занимает верхние 25 м модели. В выходном файле программы GMC содержится та же глубинная модель с добавленным неоднородным верхним слоем.

Для решения прямой 3D-задачи для вариантов модели с однородным и неоднородным верхним слоем применялась программа MT3DFwd [Mackie and Madden, 1997]. Было использовано 15 периодов от 0,1 до 5000 с. Результатом расчетов были значения компонент электрического и магнитного поля на поверхности модели для двух поляризаций поля.

Для расчета компонент MT матриц [Z], [W], [M], [T] была задействована программа MTDA (MagnetoTelluric Data Analysis), также написанная нами в системе MATLAB. Здесь [Z] – тензор импеданса, [W] – матрица Визе – Паркинсона, [M] – горизонтальный магнитный тензор, [T] – теллурический тензор [Бердичевский и Дмитриев, 2009]. Помимо компонент этих матриц, программа MTDA рассчитывает ряд инвариантных параметров, а также сохраняет результаты в текстовых файлах для дальнейшей визуализации с помощью стандартных программ, например Grapher и Surfer, компании Golden Software.

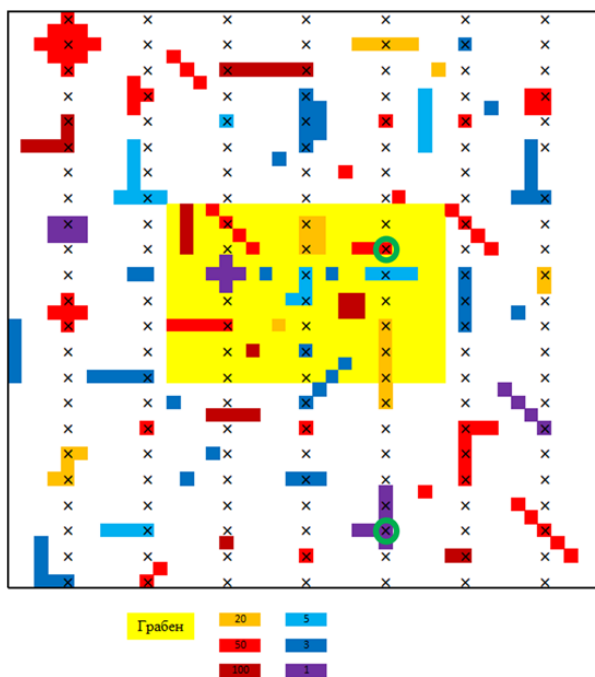


Рис. 2  
Карта верхнего слоя модели, содержащего ППН  
Фоновое значение УЭС – 10 Ом·м, УЭС ППН меняются от 1 до 100 Ом·м. Желтым прямоугольником показано положение глубинного грабена. Крестики – точки МТЗ. Зелеными кружками обведены точки, кривые в которых представлены на рис. 3

### Анализ эффективного импеданса

Мы будем сравнивать МТ-данные, полученные для моделей с однородным и неоднородным верхним слоем. Отметим, что в общем случае тензор импеданса  $[Z]$  можно представить в виде разложения  $[Z] = [e][ZR][h^{-1}]$  [Бердичевский и Дмитриев, 2009]. Здесь  $[ZR]$  – региональный тензор импеданса, не искаженный влиянием ППН, а  $[e]$  и  $[h]$  – матрицы локальных (приповерхностных) электрических и магнитных искажений. Причем на низких частотах, когда глубина проникновения поля существенно превышает мощность неоднородного слоя, матрица  $[e]$  становится вещественной, а матрица  $[h]$  превращается в единичную и может не рассматриваться. В нашем случае модели с однородным верхним слоем будет отвечать тензор  $[ZR]$ , а модели с неоднородным верхним слоем – тензор  $[Z]$ .

Здесь мы ограничимся рассмотрением инвариантных характеристик МТ-матриц, то есть таких, которые не меняются при повороте системы координат. Для тензора  $[Z]$  важным инвариантом является эффективный импеданс  $Z_{eff} = \sqrt{Z_{xx} \cdot Z_{yy} - Z_{xy} \cdot Z_{yx}}$ . Его модуль может быть пересчитан в эффективное кажущееся сопротивление  $\rho_{eff} = 0,127 \cdot T \cdot |Z_{eff}|^2$ , где  $T$  – период колебаний поля.

На рис. 3 представлены кривые эффективного кажущегося сопротивления и фазы эффективного импеданса, полученные в точках, обведенных кружками на карте на рис. 2. Как уже упоминалось во введении, под влиянием от аномального поля, связанного с ППН, происходит статический сдвиг кривых кажущегося сопротивления, а фазовые кривые остаются неизменными. На рис. 3а, б изображены кривые МТЗ над проводящей ППН, здесь кривая ка-

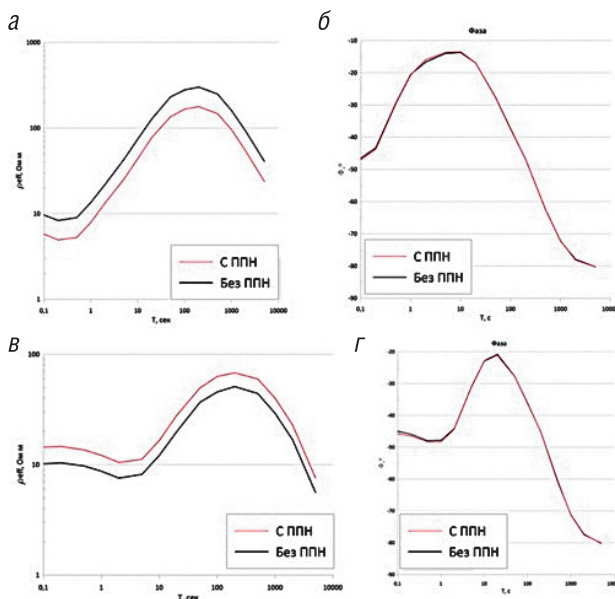


Рис. 3

Кривые эффективного кажущегося сопротивления (а, в) и фазы эффективного импеданса (б, г)

Вверху (а, б) – точка над проводящей ППН (1 Ом·м),  
внизу (в, г) – над высокоомной ППН (50 Ом·м)

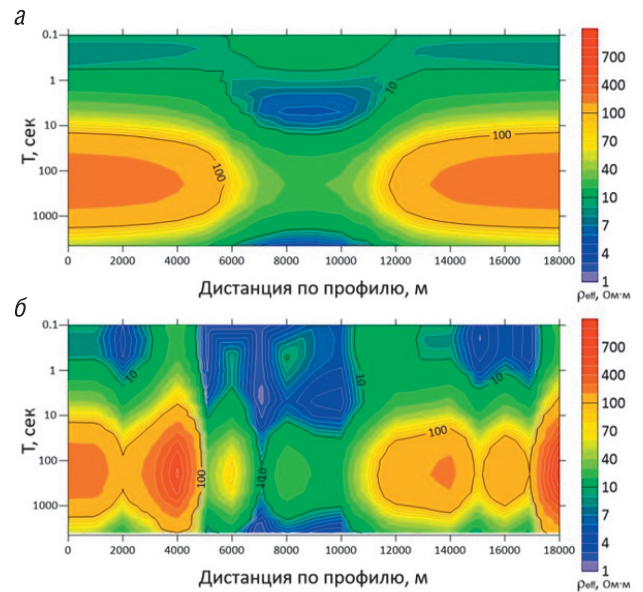


Рис. 4

Частотные разрезы эффективного кажущегося сопротивления по центральному профилю: а – модель без ППН, б – модель с ППН

жущегося сопротивления смещается вниз (по сравнению с результатами для модели с однородным приповерхностным слоем). На рис. 3в, г показаны кривые над высокоомной ППН, здесь, соответственно, кривая кажущегося сопротивления смещается вверх. Если точка наблюдения располагается рядом с приповерхностной неоднородностью, искажающий эффект проявляется слабее и полностью затухает при удалении от ППН.

При анализе данных МТЗ по профилю обычно используются частотные разрезы или псевдоразрезы. При этом по горизонтали откладывается расстояние по профилю (дистанция), а по вертикали – период колебаний поля. На рис. 4 представлены частотные разрезы эффективного кажущегося сопротивления по центральному профилю (расположение профилей на рис. 2). Верхний частотный разрез (а) получен для модели без ППН, нижний (б) – для модели с ППН. На рис. 4а глубинный грабен отчетливо наблюдается как область пониженных сопротивлений по центру разреза между периодами 1 и 10 с, его влияние сохраняется и до самых больших периодов. На рис. 4б также можно выделить эту область пониженных сопротивлений, но она маскируется влиянием ППН, которые приводят к появлению на частотном разрезе характерных вертикальных «столбов».

При анализе площадных данных МТЗ удобно использовать карты, которые строятся на различных периодах. На рис. 5 приведены карты эффективного кажущегося сопротивления для периодов 1 и 100 с. На периоде 1 с грабен только начинает проявляться, на 100 с он дает существенную низкоомную аномалию. При добавлении в модель слоя с ППН границы грабена видны менее точно, появляются мелкие аномалии. Их характерной особенностью является то, что они сохраняются при изменении периода.

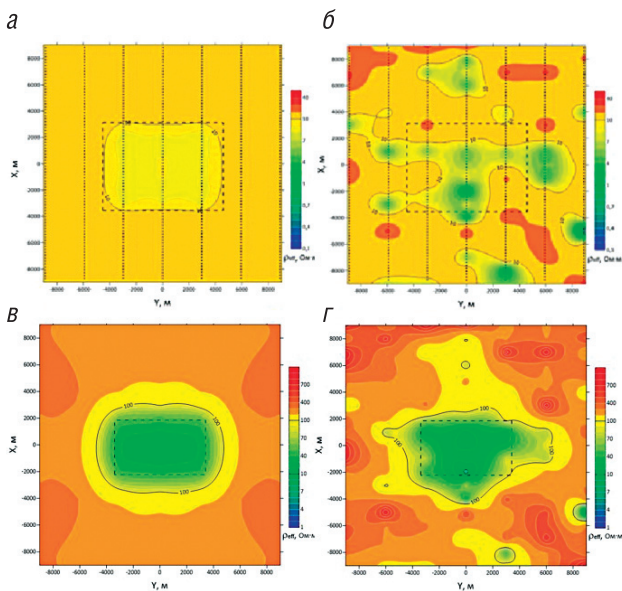


Рис. 5

Карты эффективного кажущегося сопротивления на периодах 1 с (а, б) и 100 с (в, г)

Слева (а, в) – модель без ППН, справа (б, г) – модель с ППН. Пунктирным прямоугольником обозначены границы грабена, линиями – положение профилей

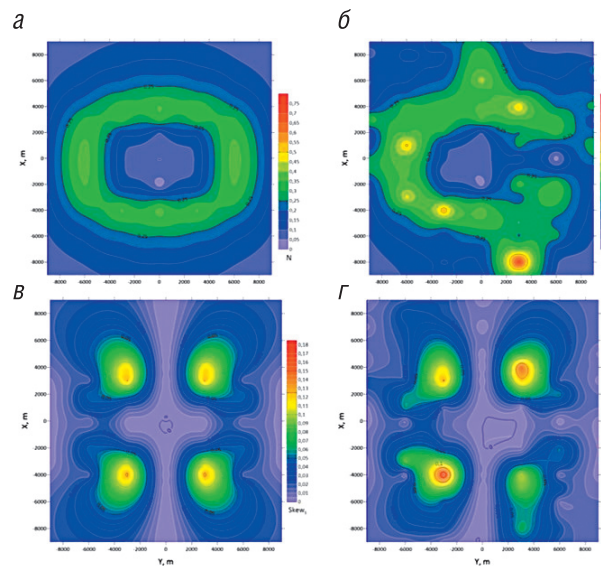


Рис. 6

Карты параметра неоднородности N (а, б) и параметра асимметрии Skew<sub>S</sub> (в, г) для периода 100 с

Слева (а, в) – модель без ППН, справа (б, г) – модель с ППН

### Анализ инвариантов магнитотеллурических матриц

Рассмотрим также карты других инвариантов. На рис. 6 приведены карты параметра неоднородности N и параметра асимметрии Свифта Skew<sub>S</sub> на периоде 100 с. Напомним, что они определяются по компонентам тензора [Z] и позволяют классифицировать среду по размерности: при больших значениях N среду нельзя считать одномерной, а при больших значениях Skew<sub>S</sub> – двумерной [Бердичевский и Дмитриев, 2009]. Из рис. 6 видно, что N принимает большие значения вблизи границ грабена, а Skew<sub>S</sub> – вблизи его углов. ППН усложняют картину, приводя к появлению новых аномалий, но местами и ослабляя аномалии от региональной структуры. Влияние ППН на картах N оказалось заметнее, чем на картах Skew<sub>S</sub>.

На рис. 7 приведены карты норм других МТ-матриц: Визе – Паркинсона [W], горизонтального магнитного тензора [M] и теллурического тензора [T]. Они рассчитывались как корни из сумм квадратов всех компонент матриц. В магнитном поле влияние ППН должно затухать с понижением частоты. Действительно, на периоде 100 с карты норм ||W|| и ||M|| при отсутствии и при наличии ППН отличаются очень мало. При этом на карте ||W|| максимумом отмечены границы глубинного грабена, а на карте ||M|| максимум располагается над его центром. В электрическом поле влияние ППН наиболее сильно и не уменьшается с понижением частоты, поэтому на карте ||T|| мы хорошо видим проявление ППН, в этом отношении данные карты похожи на рассмотренные выше карты кажущегося сопротивления.

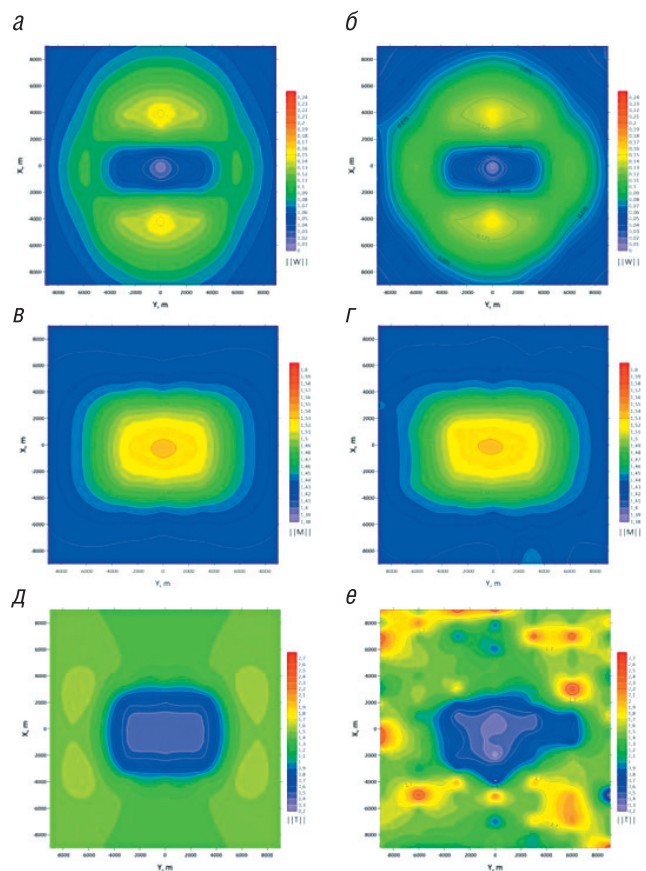


Рис. 7

Карты норм матриц ||W|| (а, б), ||M|| (в, г) и ||T|| (д, е) для периода 100 с

Слева (а, в, д) – модель без ППН, справа (б, г, е) – модель с ППН

### Заключение

В статье представлены две геоэлектрические модели с одинаковой глубинной структурой, но отличающиеся отсутствием и наличием приповерхностного неоднородного слоя. Влияние ППН на кривые МТЗ проявляется в статическом смещении кривых кажущегося сопротивления, при этом оно не затрагивает фазовые кривые. На частотных разрезах кажущегося сопротивления ППН приводят к появлению характерных вертикальных «столбов». На картах инвариантов тензора импеданса  $[Z]$  и теллурического тензора  $[T]$ , которые зависят от электрического поля, возникают сильные искажения, в то время как в матрице

Визе – Паркинсона  $[W]$  и горизонтальном магнитном тензоре  $[M]$ , которые строятся по магнитному полю, приповерхностные искажения затухают с понижением частоты.

Дальнейшее развитие работы предполагает использование представленных синтетических МТ-данных для оценки эффективности методов подавления аномалий от ППН, в частности методов декомпозиции тензора импеданса (метод Бара [Bahr, 1988], Грума – Бэйли [Groom and Bailey, 1989] и др.) и методов нормализации кривых МТЗ (пространственной фильтрации и др.).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
2. Новожицкий К., Пушкарев П.Ю. Анализ эффективности программ для двумерной инверсии магнитотеллурических данных // Физика Земли. 2001. № 6. С. 72–85.
3. Bahr K. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion // Geophysics. 1988. Vol. 62. P. 119–127.
4. Berdichevskiy M.N., Dmitriev V.I. Distortion of magnetic and electrical fields by near-surface lateral inhomogeneities. Acta Geodaet., Geophys. et Montanist. Acad. Sci. Hung. 1976. Tomus 11 (3–4). P. 447–483.
5. Groom R.W., Bailey R.C. Decomposition of magnetotelluric impedance tensor in the presence of local three-dimensional galvanic distortion // Journal of Geophysical Research. 1989. Vol. 94. P. 1913–1925.
6. Jones A. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment // Geophysics. 1988. Vol. 53. P. 967–978.
7. Mackie R.L., Madden T.R. Instruction for running 3D MT forward modeling program. MIT, 1997.

### REFERENCES

1. Berdichevsky MN, Dmitriev VI. Models and Methods of Magnetotellurics. Moscow: Nauchny mir, 2009, 680 p. (in Russian).
2. Nowozynski K, Pushkarev PYu. The Efficiency Analysis of Programs for Two-Dimensional Inversion of Magnetotelluric Data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2001; 37(6):503–516 (in Russian).
3. Bahr K. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion. *Geophysics*. 1988; (62):119–127.
4. Berdichevskiy MN, Dmitriev VI. Distortion of magnetic and electrical fields by near-surface lateral inhomogeneities. *Acta Geodaet., Geophys. et Montanist. Acad. Sci. Hung.* 1976; 11(3–4):447–483.
5. Groom RW, Bailey RC. Decomposition of magnetotelluric impedance tensor in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. *Journal of Geophysical Research*. 1989; (94):1913–1925.
6. Jones A. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment. *Geophysics*. 1988; (53):967–978.
7. Mackie RL, Madden TR. Instruction for running 3D MT forward modeling program. MIT, 1997.

Положительная рецензия 29.09.2023

### ОБ АВТОРАХ



СУКОНКИН  
Максим Алексеевич

Аспирант кафедры геофизических методов исследований земной коры геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Окончил магистратуру геологического факультета МГУ в 2021 г. Автор 2 научных статей и 2 докладов.



ПУШКАРЕВ  
Павел Юрьевич

Доктор геолого-минералогических наук, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры геофизических методов исследований земной коры геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Окончил МГУ в 1998 г. Специалист в области электромагнитных зондирований Земли. Автор более 100 научных статей.