

Санкт-Петербургский государственный университет

Материалы
12-ой международной школы-конференции

ПРОБЛЕМЫ ГЕОКОСМОСА

Санкт-Петербург, Петергоф

8-12 октября 2018 г.

Ответственные редакторы:

Н.Ю. Бобров, Н.В.Золотова, А.А. Костеров, Т.Б. Яновская

Санкт-Петербург 2018

УДК 550.8; 551
ББК 26.3
П78

П78 **Проблемы геокосмоса.** Материалы 12-й международной школы-конференции. Санкт-Петербург, Петергоф. 8–12 октября 2018 г. / Отв. редакторы: Н. Ю. Бобров, Н. В. Золотова, А. А. Костеров, Т. Б. Яновская. — СПб.: Изд-во ВВМ, 2018. — 385 с.

ISBN 978-5-9651-1207-4

О роли эффекта Холла при магнитотеллурическом зондировании

В. В. Плоткин⁽¹⁾, В. С. Могилатов⁽¹⁾

1 - Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН («ИНГГ СО РАН»), 630090,

Россия, г. Новосибирск, просп. ак. Коптюга, 3,

Телефон: 73833332905, e-mail: PlotkinVV@ipgg.sbras.ru;

Телефон: 73833309602, e-mail: MogilatovVS@ipgg.sbras.ru

Аннотация.

Вмещающие породы над залежами нефти и газа, пронизываемые потоком углеводородных флюидов, представляют собой полупроводниковую среду, в которой возможно проявление эффекта Холла. Интерес к этому явлению возник по результатам электромагнитных зондирований с контролируруемыми источниками в районах ареалов углеводородов. Аналогичные явления возможны и вследствие воздействия магнитного поля Земли на токи, вызываемые во флюидах при электромагнитных зондированиях пористых геологических сред. Здесь велика роль вязкости, коэффициенты которой можно определить в ходе экспериментов. Пока для геологической среды характеристики микропроцессов известны недостаточно, поэтому лучше обратиться к эксперименту. Для его планирования можно учесть влияние постоянного магнитного поля Земли, вводя холловскую проводимость в тензор электропроводности. В анизотропной среде поле расщепляется на составляющие, отличающиеся коэффициентами затухания и фазовой скоростью – нормальные моды. Отличие мод связано с их поляризацией и направлением вращения вектора поля, в одной моде поле вращается по часовой стрелке, во второй – против. Ясно, что за счет эффекта Холла отклик среды может быть неодинаковым в случаях возбуждения среды лишь одной из нормальных волн. Для обнаружения влияния эффекта Холла при магнитотеллурическом зондировании (МТЗ) предлагается метод поляризационного анализа, основанный на алгоритме обработки данных с разделением временного спектра магнитотеллурического (МТ) поля на спектры нормальных мод с правой и левой круговой поляризацией. Приводятся численные оценки и результаты специального эксперимента.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, эффект Холла, нормальные моды, правая и левая круговые поляризации

Введение

Вмещающие породы над залежами нефти и газа, пронизываемые потоком углеводородных флюидов, представляют собой полупроводниковую среду, в которой возможно проявление эффекта Холла [1]. Интерес к этому явлению возник по результатам электромагнитных зондирований с контролируруемыми источниками в районах ареалов углеводородов [2]. Аналогичные явления возможны и вследствие воздействия магнитного поля Земли на токи, вызываемые во флюидах при электромагнитных зондированиях пористых геологических сред. В этой модели велика роль вязкости и электропроводности, коэффициенты которых могут быть определены в ходе электромагнитных зондирований.

Метод поляризационного анализа

Поскольку для геологической среды характеристики микропроцессов известны недостаточно, получить надежные оценки величины эффекта теоретически затруднительно. Приходится пока ориентироваться на эксперимент, но необходим выбор условий его постановки. Чтобы продемонстрировать предполагаемое влияние постоянного магнитного поля Земли, можно ввести холловскую проводимость σ_H в тензор электропроводности. В анизотропной среде поле расщепляется на составляющие, отличающиеся коэффициентами затухания и фазовой скоростью – нормальные моды. Отличие мод связано с их поляризацией и направлением вращения вектора

поля, в одной моде поле вращается по часовой стрелке, во второй – против. Из физических соображений ясно, что за счет эффекта Холла отклик среды может быть неодинаковым в случаях возбуждения среды лишь одной из нормальных волн.

Анализ данных МТЗ показывает, что в общем случае направление вращения векторов МТ-поля (правая или левая поляризация) определяется характеристиками их частотного спектра. Хорошо известно, что поляризация - эллиптическая, и на разных частотах направление вращения вектора поля определяется разностью фаз спектральных составляющих горизонтальных компонент. Если принять зависимость поля от времени в виде $\sim e^{i\omega t}$ и ввести обозначения $H_x(\omega) = A_x(\omega)e^{i\varphi_x}$, $H_y(\omega) = A_y(\omega)e^{i\varphi_y}$, то горизонтальная компонента вектора магнитного поля вращается по часовой стрелке при $\sin(\varphi_y - \varphi_x) > 0$, и против часовой стрелки при $\sin(\varphi_y - \varphi_x) < 0$. Это можно объяснить соотношением амплитуд нормальных мод с круговой поляризацией, представляющих произвольное МТ поле.

Амплитуды мод можно определить с помощью поляризационного анализа временного спектра МТ-поля. Для этого необходимо знать коэффициенты поляризации мод. Расчеты, проведенные в [3] для горизонтально-слоистой среды с параметрами $\sigma_n, h_n, n = 1, \dots, N, h_N \rightarrow \infty$, показали, что в средних широтах при слабом эффекте, когда $\sigma_H \ll \sigma_n$, коэффициенты поляризации мод во всех слоях близки к значениям $\pm i$. Это означает, что в этих условиях нормальными являются моды с правой или левой круговой поляризацией. Тогда разложение МТ-поля при произвольной эллиптической поляризации на моды с правой и левой круговой поляризацией можно выполнить, используя следующее представление для реальной части горизонтальных компонент:

$$Re\{H_x(\omega)e^{i\omega t}\} = Re\{A_x(\omega)e^{i(\varphi_x + \omega t)}\} = A_1 \cos(\varphi_1 + \omega t) + A_2 \cos(\varphi_2 + \omega t), \quad (1a)$$

$$Re\{H_y(\omega)e^{i\omega t}\} = Re\{A_y(\omega)e^{i(\varphi_y + \omega t)}\} = A_1 \sin(\varphi_1 + \omega t) - A_2 \sin(\varphi_2 + \omega t), \quad (1b)$$

где мода с индексом 1 характеризуется вращением горизонтальной компоненты магнитного поля против часовой стрелки, а мода с индексом 2 – по часовой. С учетом (1) амплитуды и фазы мод вычисляются по формулам поляризационного анализа:

$$H_{1,2}(\omega) = A_{1,2}e^{i\varphi_{1,2}},$$

$$A_1^2 = [A_x^2 + A_y^2 + 2A_xA_y \sin(\varphi_x - \varphi_y)]/4, \quad A_2^2 = [A_x^2 + A_y^2 - 2A_xA_y \sin(\varphi_x - \varphi_y)]/4, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{A_x \sin \varphi_x + A_y \cos \varphi_y}{A_x \cos \varphi_x - A_y \sin \varphi_y}, \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{A_x \sin \varphi_x - A_y \cos \varphi_y}{A_x \cos \varphi_x + A_y \sin \varphi_y}$$

По формулам, аналогичным (2), осуществляется переход к модам и для горизонтальных компонент электрического поля. Далее для любой временной гармоник вместо стандартных импедансных соотношений для горизонтальных компонент МТ-поля вводятся импедансные соотношения для мод с правой и левой круговой поляризацией:

$$E_1(\omega) = Z_{11}(\omega)H_1(\omega) + Z_{12}(\omega)H_2(\omega), \quad E_2(\omega) = Z_{21}(\omega)H_1(\omega) + Z_{22}(\omega)H_2(\omega).$$

(3)

Различие импедансов мод $Z_{11}(\omega)$ и $Z_{22}(\omega)$ в (3) будет указывать на возможное присутствие эффекта Холла. Это различие можно характеризовать, переходя также по обычным формулам к кривым кажущихся сопротивлений и фазам введенных импедансов.

Численная модель влияния эффекта Холла при МТЗ

Проиллюстрируем сказанное численными расчетами с синтетическими данными МТЗ, полученными следующим образом. Вначале с использованием нормальных распределений случайных величин синтезировались исходные временные спектры для горизонтальных компонент $H_{x,y}(\omega)$ магнитного поля. Параметры случайных распределений выбирались для достижения сходства с примерами имеющихся экспериментальных данных. Такой подход допускает многократное повторение численных экспериментов без проведения натурных экспериментальных МТЗ. Затем для заданной модели горизонтально-слоистой среды проводились расчеты тензора импеданса методом, описанным в [4]. По временным спектрам магнитного поля $H_{x,y}(\omega)$ с помощью стандартных импедансных соотношений (4) определялись временные спектры горизонтальных компонент электрического поля:

$$E_x(\omega) = Z_{xy}(\omega)H_y(\omega) + Z_{xx}(\omega)H_x(\omega), \quad E_y(\omega) = Z_{yx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega)H_y(\omega). \quad (4)$$

Используя такую схему подготовки синтетических данных МТЗ, далее рассмотрим результаты их обработки с помощью предлагаемого варианта поляризационного анализа МТ-поля. Численные расчеты выполнялись для модели горизонтально-слоистой среды, состоящей из четырех слоев с мощностями сверху вниз 0.7, 5, 2 и 9 км и удельными сопротивлениями (УЭС) 100, 1000, 300 и 100 Ом·м, соответственно, и подстилающей средой с УЭС 20 Ом·м.

Интересно сравнить результаты расчетов для случаев, когда холловская проводимость среды равна нулю, и когда она присутствует во всех слоях среды (считалось, что $\sigma_H = 1/1000$ См/м, магнитное поле Земли отклонено от вертикали на угол 25° , ось OX задана в плоскости магнитного меридиана и направлена на север, ось OZ направлена вглубь среды). Кривые МТЗ, полученные по модовым импедансам $Z_{11}(\omega)$ и $Z_{22}(\omega)$, представлены на рис. 1 (слева – когда холловская проводимость отсутствует, справа – когда она не равна нулю). Естественно, что наблюдаемое различие модовых кривых растет с увеличением величины холловской проводимости. Необходимо отметить, что это различие практически не зависит от соотношения амплитуд $A_{x,y}(\omega)$ в исходных спектрах горизонтальных компонент магнитного поля.

Возникает вопрос, а связан ли наблюдаемый эффект именно с влиянием холловской проводимости? Не будут ли аналогичными проявления, например, в случае кажущейся анизотропии, возникающей в тонкослоистой среде? Чтобы выявить различия в результатах обработки предлагаемым методом данных для среды с холловской проводимостью и для тонкослоистой среды, были также проведены расчеты для трансверсально-анизотропной среды. Предполагалось, что в этом случае в системе координат, где тензор $\hat{\sigma}'$ является диагональным (в главных осях), к анизотропии

приводят чередующиеся тонкие слои с разным УЭС, нормаль к которым направлена вдоль оси OZ' , и считалось, что $\sigma'_{xx} = \sigma'_{yy}$, $\sigma'_{zz} = \sigma'_{xx}/k_a$, где k_a коэффициент анизотропии.

Заметим, что в случае учета холловской проводимости принималось, что геомагнитное поле направлено вдоль оси OZ' в той же самой системе координат, а тензор $\hat{\sigma}'$ имеет здесь одинаковые диагональные компоненты $\sigma'_{xx} = \sigma'_{yy} = \sigma'_{zz}$, но появляются дополнительные антисимметричные члены $\sigma'_{xy} = -\sigma'_{yx} = \sigma_H$. С этими обстоятельствами связаны отличия тензоров $\hat{\sigma}'$ при изучении эффектов Холла и кажущейся анизотропии тонкослоистой среды. Для получения тензоров $\hat{\sigma}$ в лабораторной системе координат в обоих случаях при расчетах использовалась одна и та же матрица перехода.

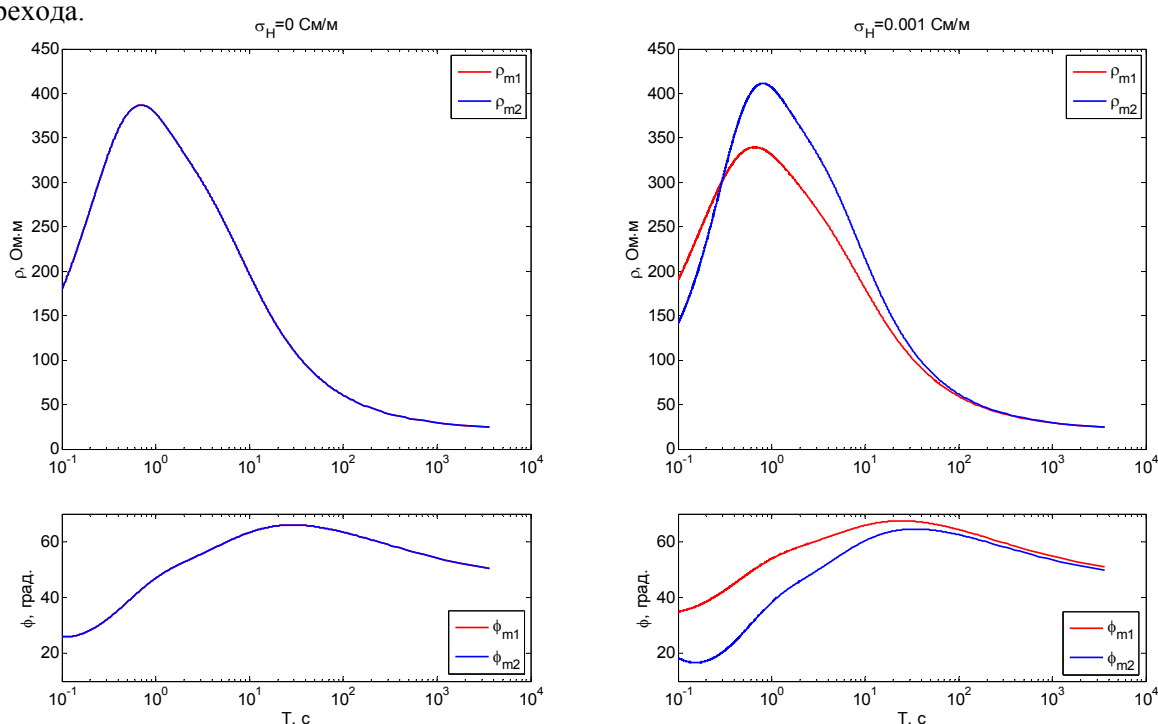


Рис. 1. - Модовые кривые МТЗ в случае холловской проводимости в среде.

В качестве примера отличий тензоров электропроводности приведем значения его компонент в лабораторной системе координат на одной и той же глубине (слева – в случае эффекта Холла, справа – для тонкослоистой среды):

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} 0.05 & 0.0009 & 0.0004 \\ -0.0009 & 0.05 & 0 \\ -0.0004 & 0 & 0.05 \end{pmatrix}, \hat{\sigma} = \begin{pmatrix} 0.05 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0485 & 0.0032 \\ 0 & 0.0032 & 0.0432 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Расчеты выполнялись для одной и той же выбранной модели горизонтально-слоистой среды из четырех слоев, описанной выше.

Полученные результаты представлены на рис. 2. Можно видеть, что для тонкослоистой среды (даже при большом коэффициенте анизотропии $k_a=1.2$) различие модовых кривых существенно меньше, чем в случае присутствия эффекта Холла.

Результаты эксперимента по обнаружению влияния эффекта Холла при МТЗ

Эксперимент по обнаружению эффекта Холла проще всего проводить для случая горизонтально-слоистой среды. Наиболее подходящий для этого участок был выбран в Татарском районе Западно-Сибирской низменности. МТЗ было проведено в июле 2018 года с помощью станции MTU-5 фирмы «Phoenix Geophysics». Регистрация сигналов длилась 40 часов. После стандартной обработки экспериментальных данных были получены результаты, представленные на рис. 3.

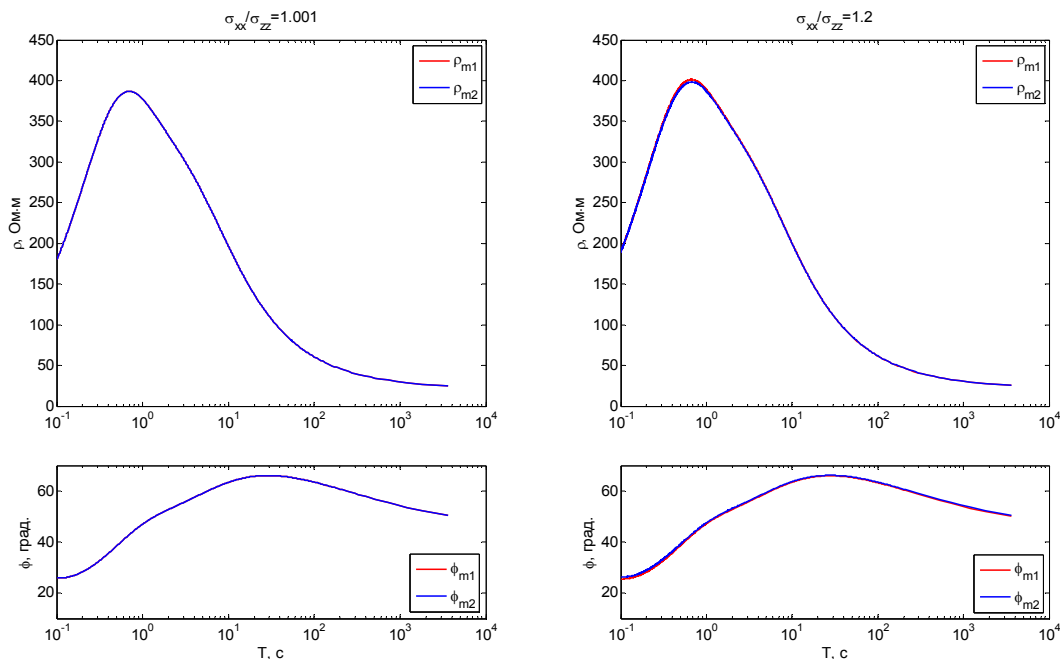


Рис. 2. - Модовые кривые МТЗ в случае тонкослоистой анизотропной среды

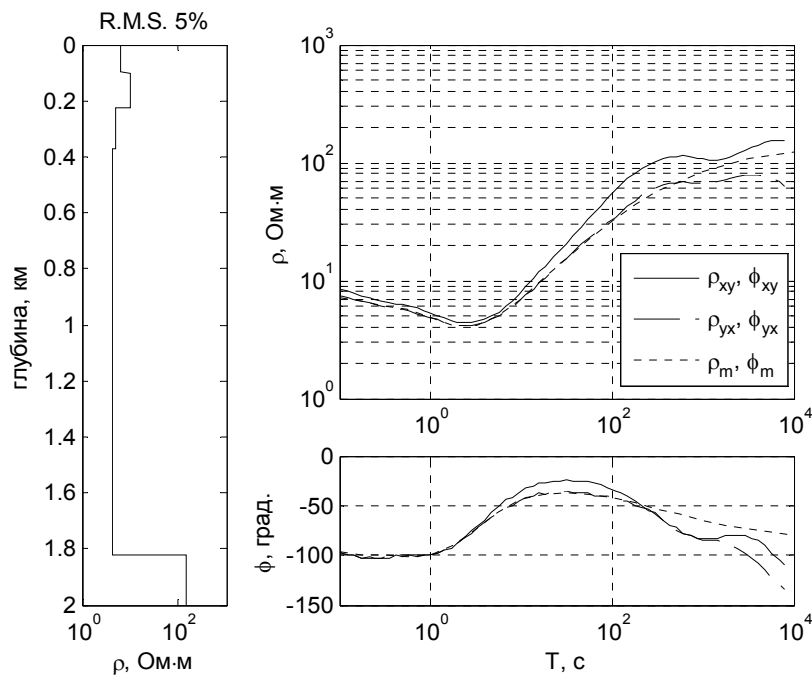


Рис. 3. - Кривые МТЗ и модель среды, полученная по результатам 1D инверсии кривых (ρ_{xy} , ρ_{yx} , ρ_m - кажущиеся сопротивления, ϕ_{xy} , ϕ_{yx} , ϕ_m , - фазы, индекс m относится к модельным значениям величин).

Как видно, на коротких временных периодах выбранный участок вполне соответствует горизонтально-слоистой среде.

Поэтому поляризационный анализ был выполнен для этих периодов (рис. 4). Точками показаны оценки модовых кажущихся сопротивлений, полученные по различным выборкам данных, сплошными линиями даны их аппроксимации полиномами. Пунктиром для примера представлены модовые кривые, рассчитанные для модели среды (пунктир) и указанного значения σ_H . Для наглядности показаны также различия модовых кривых. Перебор различных других моделей среды и σ_H позволяет лишь приближенно сблизить расчетные модовые кривые с экспериментальными, поскольку надо корректно учесть не только сами кривые, но и их отличие. Такие оценки холловской проводимости σ_H по различиям модовых кривых для одномерной модели среды показывают, что ее возможные значения не превышают величин $\sim 10^{-3}$ См/м.

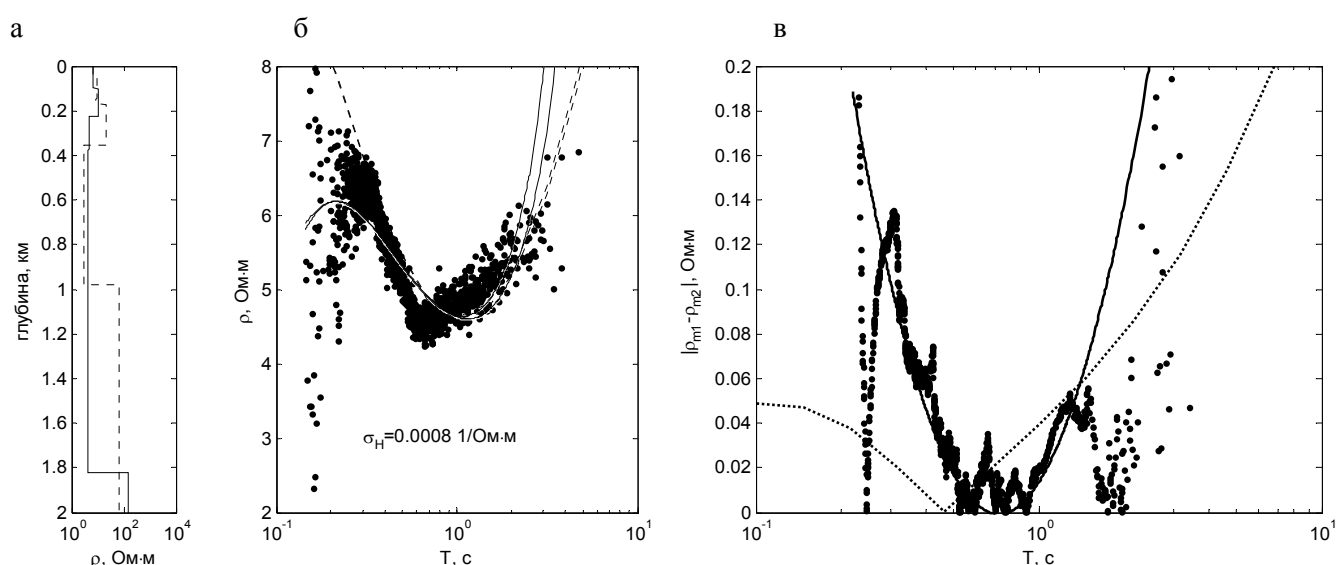


Рис. 4. - Модели среды (а), модовые кривые кажущихся сопротивлений (б) и их различие (в) (точки – экспериментальные оценки ρ_{11} и ρ_{22} , сплошные линии - аппроксимации оценок полиномами, пунктир – результаты расчета модовых кривых для модели среды, показанной пунктиром, и приведенного значения холловской проводимости σ_H).

Выводы

- 1) Обнаружить проявления эффекта Холла при МТЗ можно, применяя метод поляризационного анализа, основанный на алгоритме обработки данных с разделением временного спектра МТ-поля на спектры нормальных мод с правой и левой круговой поляризацией.
- 2) Установлена возможность по результатам обработки данных предлагаемым методом различать эффекты для среды с холловской проводимостью и для тонкослоистой среды.
- 3) Первые экспериментальные оценки показали, что σ_H не превышает значений $\sim 10^{-3}$ См/м.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 17-05-00083.

Список литературы

1. Гололобов Д. В., Малевич И. Ю. Физические и электрохимические процессы в среде над залежью углеродов // *Доклады БГУИР*. – 2005. – № 1. – С. 22–27.
2. Могилатов В.С. О влиянии геомагнитного поля на процесс установления токов в земле // *Геофизика*. – 2013. – № 4. – С. 70–75.
3. Плоткин В.В. Методика определения вклада эффекта Холла при магнитотеллурическом зондировании // *XIII Международный научный конгресс и выставка ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2017. Международная научная конференция Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология* [Электронное издание]. Новосибирск: СГУГиТ. 2017. Сборник материалов. - Т. 2. - № 3. - С. 187-192.
4. Александров П.Н. Прямая задача геоэлектрики в одномерных бианизотропных средах // *Физика Земли*. – 2001. – № 4. – С. 51–61.