

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО. НАПРАВЛЕНИЯ
И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
ЭКОНОМИКА. ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

Т. 3

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2018

Ответственные за выпуск:

Доктор геолого-минералогических наук, академик РАН,
главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
А. Э. Конторович

Доктор технических наук, академик РАН, академик РАН,
главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
М. И. Энов

Доктор технических наук, директор Института нефтегазовой геологии
и геофизики СО РАН, Новосибирск
И. Н. Ельцов

Кандидат технических наук, директор Института горного дела
им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск
А. С. Кондратенко

Кандидат геолого-минералогических наук, исполнительный директор
Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики
и минерального сырья, г. Новосибирск
М. Ю. Смирнов

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному округу
Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», Новосибирск
А. И. Неволько

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля
2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное
дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторож-
дений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов
в 6 т. Т. 3. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 318 с.

В сборнике опубликованы материалы XIV Международного научного конгресса
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции
«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разра-
ботки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» (секция «Гео-
логическое, геофизическое и геохимическое обеспечение поиска и разведки полезных
ископаемых. Геотехнологии. Геоэкология»).

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 3

© СГУГиТ, 2018

АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ЗОНДИРОВАНИЯХ СТАНОВЛЕНИЕМ

Владимир Сергеевич Могилатов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, e-mail: MogilatovVS@ipgg.sbras.ru

Владимир Владимирович Потапов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: PotapovVV@ipgg.sbras.ru

Анастасия Александровна Горевачева

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, аспирант, e-mail: Lapkovskaya.a.a@gmail.com

Рассматриваются эффекты взаимодействия магнитного поля Земли и вторичных токов в геоэлектromагнитных зондированиях методом становления. Это взаимодействие, в частности, проявляется в эффективной анизотропии проводимости горных пород, вызванной эффектом Холла. Анализируются результаты предварительных экспериментов.

Ключевые слова: гальваномангнитные явления, геоэлектromагнитные зондирования, зондирования становлением, геомагнитное поле, эффект Холла, эффект Лоренца.

ANALYSIS AND EXPERIMENTAL DETECTION OF GALVANOMAGNETIC PHENOMENA IN TEM

Vladimir S. Mogilatov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, e-mail: MogilatovVS@ipgg.sbras.ru

Vladimir V. Potapov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: PotapovVV@ipgg.sbras.ru

Anastasia A. Goreyavcheva

Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D. Student, e-mail: LapkovskayaAA@ipgg.sbras.ru

The effects of interaction between the Earth's magnetic field and secondary currents in geoelectromagnetic sounding are considered. This interaction, in particular, is manifested in the effective anisotropy of the conductivity of rocks caused by the Hall effect. The results of preliminary experiments are analyzed.

Key words: galvanomagnetic phenomena, transient sounding, geomagnetic field, Hall effect, Lorentz effect.

Геоэлектромагнитные поля, в принципе, взаимодействуют с магнитным полем Земли, что следует самым прямым образом из фундаментального физического явления – эффекта Лоренца. Проблема состоит только в установлении реального проявления этого фактора в геоэлектромагнитных зондированиях. Самый первоначальный анализ показывает, что это может проявляться в эффекте Холла в горных породах. Кроме того, в результате тенденции к криволинейной траектории носителей тока под влиянием силы Лоренца возникает эффективная намагниченность геологической среды, зависящая от состояния геосреды на микроуровне. Эти гальваномагнитные эффекты, возникающие в скрещенных электрическом и магнитном полях, хорошо известны в физике [2–4], но не исследовались применительно к геологической среде. Сами авторы убеждены, что геомагнитные эффекты уже проявляли себя в некоторых ситуациях в электроразведочных исследованиях [5]. Необходимо, во-первых, достоверно обнаружить эти эффекты, а во-вторых, определить характерные параметры. По нашему мнению, наиболее подходящим способом для этого является зондирование становлением электромагнитного поля (как наиболее чувствительный метод). Но даже в рамках этого метода нужно рассмотреть особые схемы, минимизирующие «нормальные» сигналы [7]. В работе предлагаются экспериментальные схемы для обнаружения и оценки гальваномагнитных эффектов в геологической среде, а также рассматриваются некоторые предварительные эксперименты.

Проявления эффекта холла в геологической среде при зондированиях становлением (ЗС)

Если структура поля достаточно простая, как это имеет место в магнито-теллурических зондированиях, то можно говорить о холловской анизотропии проводимости. Однако заметим, что в ЗС, в которых используются сосредоточенные источники, притом довольно различные (токовая петля, заземленная линия), структуры возбуждаемых полей более сложные и разнообразные, чем в МТЗ. Соответственно, холловская проводимость (и анизотропия) имеет более сложный и более фиктивный характер, поэтому для описания влияния геомагнитного поля в ЗС мы применим другой подход. Учитывая наличие силы Лоренца, можно формально представить первое уравнение Максвелла в виде

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \sigma \cdot \mathbf{E} + v \cdot [\mathbf{j}, \mathbf{H}^0], \quad (1)$$

где $\mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{E}$, v – коэффициент (в м/А), удовлетворяющий размерности и учитывающий способность среды к появлению холловского тока; $\mathbf{H}^0$ – поле Земли. Или

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \sigma \cdot \mathbf{E} + \sigma v H^0 \cdot [\mathbf{E}, \mathbf{e}^0], \quad (2)$$

где $\mathbf{e}^0$ – единичный вектор в направлении земного поля.

Теперь мы видим, что дополнительная холловская проводимость $\sigma_H = \sigma \nu H^0$ складывается из разнородных факторов. Отчасти она присуща среде и связана (посредством коэффициента ν) с такими характеристиками микропроцессов в среде, как подвижность носителей тока, длина свободного пробега и прочее. Холловская проводимость также пропорциональна обычной проводимости и напряженности земного поля. И есть еще переменный фактор – конфигурация токов по отношению к направлению поля Земли. Для каждого конкретного метода ЗС эту ситуацию можно описать эффективной тензорной проводимостью (холловской анизотропией).

Рассмотрим наиболее простую ситуацию – процесс становления от горизонтальной токовой петли в горизонтально-слоистой среде. Решение хорошо известно (например, [1, 6]). Поле осесимметрично и в цилиндрической системе координат имеет магнитные компоненты H_r , H_z и единственную электрическую – E_ϕ . Примем, что магнитное поле Земли вертикально. Тогда из уравнения (2), раскрывая векторное произведение, получим, что появляется радиальная плотность тока

$$j_r = \sigma_H \cdot E_\phi = \sigma \nu H^0 \cdot E_\phi. \quad (3)$$

В первом приближении E_ϕ есть решение задачи без магнитного поля Земли. Можно рассматривать эффективную тензорную проводимость с холловскими компонентами $\sigma_H = \sigma \nu H^0$. А можно считать, что в изотропной среде с проводимостью σ появляется холловская радиальная электрическая компонента (рис. 1):

$$E_r = \nu H^0 E_\phi \equiv \frac{\sigma_H}{\sigma} E_\phi. \quad (4)$$

Первую трактовку удобно использовать в случае МТЗ. Однако в ЗС эффективный тензор проводимости станет зависимым от типа источника, что неудобно.



Рис. 1. Появление холловской напряженности электрического поля

Так или иначе, зная параметр ν , можно проводить прямое моделирование процессов становления с учетом геомагнитного фактора. Параметр ν можно

связать с подвижностью носителей тока (μ) и с коэффициентом Холла (R), которые определены для некоторых материалов и меняются в широких пределах. Проблема, однако, в том, что это не имеет отношения к геологической среде. Собственно, мы предлагаем способ экспериментального определения параметров эффекта Холла в геологической среде.

Как показывает формула (4), применяя токовую петлю и измеряя радиальной линией разность потенциалов,

$$\Delta U = \nu H^0 \cdot \int_{\eta}^{r_2} E_{\varphi}(r) dr, \quad (5)$$

где для известной горизонтально-слоистой среды функция E_{φ} , как и интеграл от нее, нам хорошо известна, мы можем рассчитать коэффициент ν , который и определяет геомагнитный эффект в любом методе ЗС.

Таким образом, предлагается простая экспериментальная схема (рис. 2). На выбранном участке с ровной поверхностью и горизонтально-слоистым разрезом (насколько это известно) располагается источник – токовая петля с импульсным возбуждением. Процесс становления регистрируется радиальной приемной линией при четырех одинаковых ее положениях относительно петли. Установка должна быть большой, как для структурных исследований. Желательно также перемещать и поворачивать всю расстановку и повторять измерения. Мы должны выявить одинаковую компоненту сигнала во всех 4 измерениях, если она не проявится явно. Все зависит от величины σ_H .

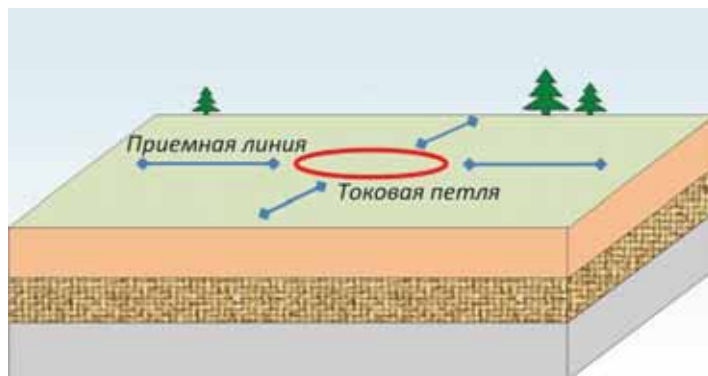


Рис. 2. Схема определения холловской проводимости в ЗС

Оценим возможный уровень сигнала. Но при этом мы должны задать некоторое конкретное значение холловской проводимости σ_H . Примем значение 0,001 См/м, которое возникает по некоторым предварительным прогнозам. В таком случае мы можем привести расчет устанавливающей эдс в приемной радиальной линии согласно рис. 2. При этом радиус токовой петли – 564 м, ток – 100 А, а линия заземлена на расстояниях 600 и 1600 м от центра петли. Среда – однородное полупространство с удельным сопротивлением 1, 10

и $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Итак, производя интегрирование по радиусу в (4) с использованием апробированной программы расчета E_ϕ , мы получили следующий численный результат для режима установления (рис. 3).

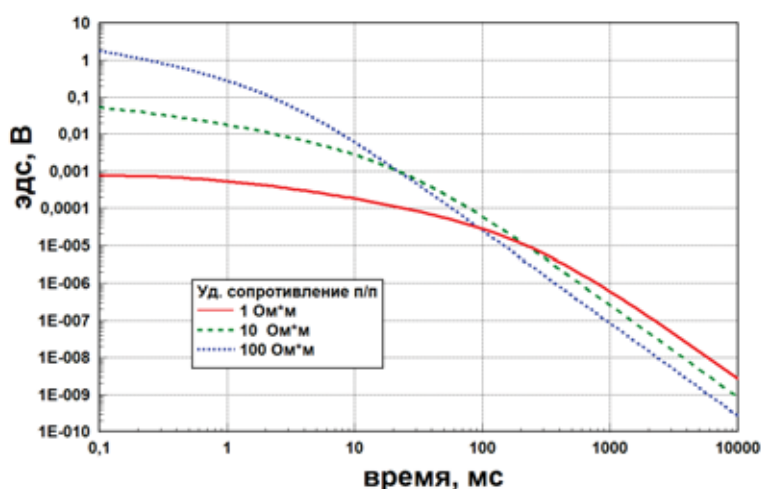


Рис. 3. Переходный сигнал в радиальной линии при $\sigma_H = 0,001 \text{ См/м}$

Исходя из того, что в электроразведке ЗС измеряются сигналы до 1 мкВ , из рис. 3 видно, что мы имеем еще 5–6 порядков в запасе (если рассматривать раннюю стадию), для того чтобы зафиксировать еще меньшую холловскую проводимость, чем $0,001 \text{ См/м}$.

Предварительные полевые эксперименты

В августе 2017 г. в пределах Чуйской степи в Кош-Агачском районе республики Алтай были проведены методические измерения методом ЗСБ с целью определить необходимые параметры измерительно-генераторного комплекса при проведении дальнейших полевых работ по гранту РФФИ.

Точка измерений находилась в 17 км от ближайшего электрифицированного населенного пункта п. Новый Бельтир, в южной части Чуйской степи. Размер генераторной петли составлял $100 \times 100 \text{ м}$. Длина измерительной линии была 20 м . Ток в генераторной петле составлял от $0,2$ до 4 А . Генераторная петля и линия располагались на местности с использованием буссоли, с предварительной дополнительной проверкой всех длин сторон петли и линии. Точность определения углов составила $0,2^\circ$, что позволило добиться точности $0,5 \text{ м}$ в местоположении углов петли и концов измерительной линии. Это позволяет определить площадь петли с точностью около 1% . В процессе измерений использовалась геофизическая аппаратура «Fast-Snap» (НПК «СибГеоСистемы»), которая позволяет проводить высокоточные измерения становления при высокой дискретизации сигнала (от 25 нс до $6,4 \text{ мкс}$).

Схема относительного расположения генераторной петли и приемных линий при различных экспериментах показана на рис. 4. Петля не перемещалась, приемная линия MN находилась в нескольких положениях.

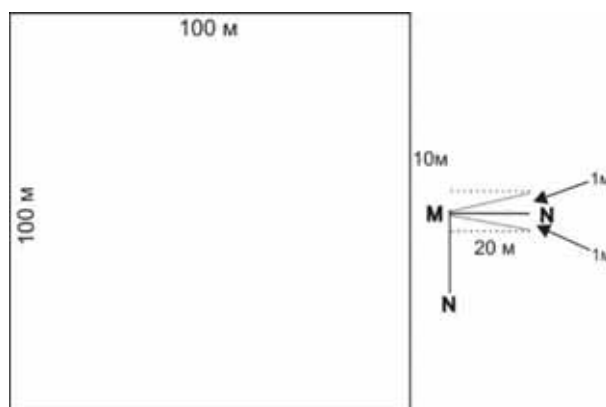


Рис. 4. Схема экспериментов

Известно, что предполагаемая величина сигналов, обусловленных эффектом Холла, очень мала, поэтому необходимо понять критерии, предъявляемые к расположению на местности генераторно-измерительного комплекса, чтобы минимизировать помехи аппаратного комплекса и внешних источников. Основные задачи, которые решались в процессе работ: определение типичных уровней шума, уровня шума, вносимого маломощными генераторами, расположенными вблизи установки, уровня шума, вносимого техногенными источниками, расположенными вдали от установки, уровня шума вносимого ветровой помехой, определение влияния на сигнал точности расположения на местности измерительной линии.

Сравнение влияния на сигнал точности расположения линии на местности проводилось с помощью сравнения сигналов от установок, в которые вносились небольшие искажения по местоположению. Схема измерений показана на рис. 4. Результаты измерений показаны на рис. 5.

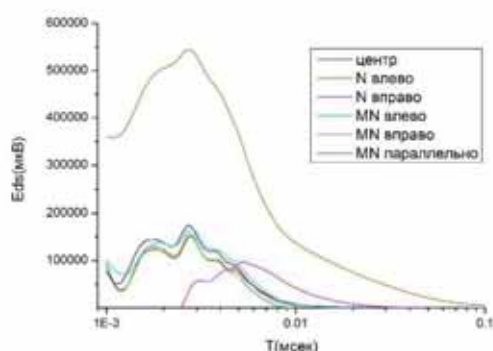


Рис. 5. Переходные сигналы с MN

Из классической теории следует, что при проведении над горизонтально слоистой средой измерений линией, которая точно перпендикулярна стороне петли и находится в ее центре, сигнал будет во всем диапазоне времен нулевым. На практике сложно добиться очень высокой точности расположения генераторной и измерительной установок и, кроме того, непросто найти разрез, который близок к горизонтально-слоистому. Тем не менее на рис. 5 видно, что, когда линия MN находится по центру (красная линия) или ее один конец отнесен влево или вправо, а также если мы всю линию относим влево или вправо, во всех случаях сигнал меняется незначительно, в пределах 15–30 %. А должен, по классическим представлениям, менять знак относительно «нулевого» положения. Это могло бы быть эффектом Холла, однако сейчас это утверждать было бы преждевременно. Установка мала, необходимо исключить влияние неоднородностей.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ваньян Л. Л. Основы электромагнитных зондирований. – М. : Недра, 1965. – 109 с.
2. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – М. : Наука, 1967. – 685 с.
3. Кучис Е. В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. – М. : Радио и связь, 1990. – 264 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. – М. : Наука, 1982. – 621 с.
5. Могилатов В. С. О влиянии геомагнитного поля на процесс установления токов в земле // Геофизика. – 2013. – № 4. – С. 70–5.
6. Могилатов В. С. Импульсная геоэлектрика. – Новосибирск : НГУ, 2014. – 180 с.
7. Могилатов В. С., Потапов В. В. Возбуждение полей в геоэлектрических экспериментах // Физика Земли. – 2007. – № 5. – С. 88–99.

REFERENCES

1. Van'jan L. L. Osnovy jelektromagnitnyh zondirovanij. – M. : Nedra, 1965. – 109 s.
2. Ginzburg V. L. Rasprostranenie jelektromagnitnyh voln v plazme. – M. : Nauka, 1967. – 685 s.
3. Kuchis E. V. Gal'vanomagnitnye jeffekty i metody ih issledovaniya. – M. : Radio i svjaz', 1990. – 264 s.
4. Landau L. D., Lifshic E. M. Jelektrodinamika sploshnyh sred. – M. : Nauka, 1982. – 621 s.
5. Mogilatov V. S. O vlijanii geomagnitnogo polja na process ustanovlenija tokov v zemle // Geofizika. – 2013. – № 4. – S. 70–75.
6. Mogilatov V. S. Impul'snaja geojelektrika. – Novosibirsk : NGU, 2014. – 180 s.
7. Mogilatov V. S., Potapov V. V. Vozbuzhdenie polej v geojelektricheskikh jeksperimentah // Fizika Zemli. – 2007. – № 5. – S. 88–99.

© В. С. Могилатов, В. В. Потапов, А. А. Горевачева, 2018