

УДК 550.837

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ЗЕМЛЕ ПРИ ЗОНДИРОВАНИЯХ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Могилатов Владимир Сергеевич¹,
mvecs@ya.ru

Потапов Владимир Владимирович¹,
potapovvv@ipgg.sbras.ru

Захаркин Александр Кузьмич²,
zaharkin@ngs.ru

Гурьев Владимир Андреевич¹,
gurevva@ya.ru

Шеин Александр Николаевич¹,
sheinan@ipgg.sbras.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

² ООО «Цикл Гео», Россия, 630102, г. Новосибирск, ул. Нижегородская, 24/1, оф. 78.

В период с 8 по 15 июля 2018 года сотрудниками Лаборатории геоэлектрики ИНГГ СО РАН проводились полевые исследования в рамках гранта РФФИ № 17-05-00083 А. Исследования направлены на обнаружение и численную оценку эффекта Холла в геологических средах. Этот эффект должен очень слабо проявляться во всех сигналах электромагнитных зондирований. Комплекс электроразведочных методов был выбран в связи с методической эффективностью и относительной простотой выполнения работ. Задачи исследований: выбор участка работ; измерение четырьмя радиальными линиями MN сигналов зондирований становлением в ближней зоне для регистрации компоненты E_R , вызванной эффектом Холла; измерение линейных компоненты E_φ для контроля измерений.

Актуальность исследования обусловлена в первую очередь тем, что гальваномагнитные эффекты (в т. ч. и эффект Холла), возникающие в скрещенных электрическом и магнитном полях, хорошо известны в физике, но не исследовались применительно к геологической среде – это значит, что данные эффекты пока неучтенным образом влияют на сигналы в геоэлектромагнитных зондированиях.

Цель: обнаружение эффекта Холла в геологических средах.

Объект: эффект Холла в геологической среде.

Методы: зондирование становлением поля в ближней зоне, магнитотеллурическое зондирование.

Результаты. Полевые исследования в 2018 г. являются первыми целенаправленными полевыми исследованиями с целью обнаружения эффекта Холла в геологической среде методами электромагнитных зондирований. Цель работ, по мнению самих исследователей, по предварительным данным, достигнута. Получена оценка холловской проводимости $\sim 1\text{--}2 \cdot 10^{-3}$ См/м.

Ключевые слова:

Электроразведка, зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), геомагнитное поле, эффект Холла, эффект Лоренца.

Введение

Невозможно отрицать, что, в принципе, существует взаимодействие между токами, возникающими в геоэлектромагнитных полях, и магнитным полем Земли. Такое взаимодействие является важнейшим и безусловным физическим явлением, базирующимся на эффекте Лоренца. Проблема состоит только в установлении реального проявления этого фактора в геоэлектромагнитных зондированиях. Первоначальный анализ показывает, что это может проявляться в эффективной анизотропии проводимости горных пород, вызванной эффектом Холла. Под эффектом Холла в случае неограниченной среды будем понимать возникновение поперечной к току и магнитному полю Земли электродвижущей силы. Кроме того, в результате тенденции к криволинейной траектории но-

сителей тока под влиянием силы Лоренца возникает эффективная намагниченность, зависящая от состояния геосреды на микроуровне.

Эти гальваномагнитные эффекты, возникающие в скрещенных электрическом и магнитном полях, хорошо известны в физике [1–14], но не исследовались применительно к геологической среде. Мы исходим из того, что эти явления существуют и пока неучтенным образом влияют на сигналы в геоэлектромагнитных зондированиях. Более того, сами авторы вполне убеждены, что геомагнитные эффекты уже проявляли себя в некоторых ситуациях в электроразведочных исследованиях [15–19]. Однако наши предыдущие попытки публикаций, основанные больше на умозрительных построениях, были частично отвергнуты – рецензенты указывали, что эффекты, может быть, и

присутствуют, но в таком количестве, которое делает проблему несуществующей в геоэлектрике. То есть сначала надо зарегистрировать эффект в поле. Это, конечно, справедливо, и самая насущная и первая необходимость состоит, во-первых, в достоверном обнаружении этих эффектов, а во-вторых, в определении характерных параметров. При поддержке Российского фонда фундаментальных исследований мы, наконец, смогли летом 2018 г. провести специальные полевые эксперименты в Новосибирской области. По нашему мнению, наиболее подходящей экспериментальной схемой являются зондирования становлением электромагнитного поля как наиболее чувствительный метод.

Теоретические предпосылки

В работах [15–19] уже обсуждались некоторые факты электроразведки зондирований становлением в ближней зоне (ЗСБ) и магнитотеллурических зондирований (МТЗ), которые могут быть отнесены на счет влияния магнитного поля Земли, но сейчас мы хотели бы обосновать возможные специальные эксперименты с целью выяснения этого обстоятельства. Прежде всего, довольно понятно, что речь идет об эффекте Холла в геологической среде. Учитывая наличие силы Лоренца, можно формально представить первое уравнение Максвелла в виде

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

где $\mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{E}$ – плотность тока; ν – коэффициент (в м/А), удовлетворяющий размерности и учитывающий способность среды к появлению холловского тока; \mathbf{H}^0 – поле Земли. Перепишем (1) как

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

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

Теперь мы видим, что дополнительная холловская проводимость $\sigma_H = \sigma \cdot \nu \cdot \mathbf{H}^0$ складывается из разнородных факторов. Отчасти она присуща среде и связана (посредством коэффициента ν) с такими характеристиками среды на микроуровне, как подвижность и тип носителей тока, длина свободного пробега, поровое пространство, флюид 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. 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, [11]). 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

$$j_r = \sigma_H \cdot E_\varphi = \sigma \cdot \nu \cdot \mathbf{H}^0 \cdot E_\varphi \quad (3)$$

и, как следует из (3), радиальная электрическая компонента (рис. 1)

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

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_H), которые определены для некоторых материалов и меняются в широких пределах. Проблема, однако, в том, что это не имеет отношения к геологической среде. В этом смысле мы о ней не знаем ничего. Собственно, мы и предлагаем способ экспериментального определения параметров эффекта Холла в геологической среде.



Рис. 1. Появление холловской напряженности E_r электрического поля

Fig. 1. Hall electric field intensity E_r appearance

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

$$\Delta U = \nu \cdot \mathbf{H}^0 \cdot \int_{r_2}^{r_1} E_\varphi(r) dr, \quad (5)$$

где, в первом приближении, функция E_φ есть хорошо известное решение для горизонтально-слоистой среды без учета геомагнитного фактора, мы можем рассчитать коэффициент ν , который и определяет геомагнитный эффект в любом методе ЗСБ.

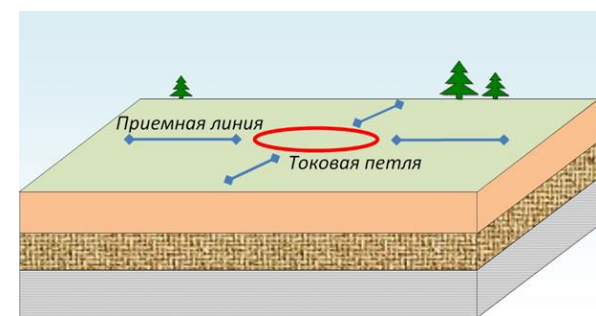


Рис. 2. Схема определения холловской проводимости в методе зондирования становлением в ближней зоне (ЗСБ)

Fig. 2. Hall conductivity determination scheme in transient electromagnetic method (TEM)

Таким образом, предлагается простая экспериментальная схема (рис. 2). На выбранном участке с ровной поверхностью и горизонтально-слоистым разре-

зом (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 четырех измерениях, если она не проявится явно. Все зависит от величины σ_H .

Место проведения экспериментов

Заранее понятно, что эффект Холла для геологических сред слаб. Для его обнаружения, прежде всего, необходимо устранить влияние нормального поля токовой петли, что мы, в принципе, делаем, применяя специфическую схему измерений (токовая петля и радиальные измерительные линии) и что, однако, ставит нас в весьма уязвимую позицию метода чистой аномалии. Поэтому необходимо добиться минимизации влияния всех факторов, которые могут исказить искомый сигнал. Основными факторами являются: наличие электромагнитных помех, локальные неоднородности в среде, горизонтально-неоднородная структура среды в районе эксперимента, нарушение

параметров генераторно-измерительного комплекса (расстановка на местности петель и линий).

Все факторы (и даже последний, геометрический) искажения сигнала напрямую зависят от места исследований. Для устранения искажений нужно было выбрать участок работ со следующими условиями:

- 1) горизонтально-слоистая среда (исключение влияния латеральных неоднородностей на сигналы);
- 2) удаленность от промышленных объектов и населенных пунктов (уменьшение уровня электромагнитных помех);
- 3) ровная по рельефу и незалесенная местность (отсутствие искажений в сигнале из-за рельефа и возможность максимально точно расположить генераторно-измерительный комплекс на местности).

После рекогносцировочных выездов было выбрано место в Татарском районе Новосибирской области недалеко от поселка Орловка. Местность характеризуется ровным рельефом (рис. 3). По априорным данным предыдущих геологических и геофизических исследований район работ очень близок к горизонтально-слоистому разрезу. Ближайший поселок удален на расстояние 5 км и вблизи нет никаких промышленных объектов и высоковольтных ЛЭП. Таким образом, все необходимые условия для успешного решения поставленных задач могут быть выполнены.

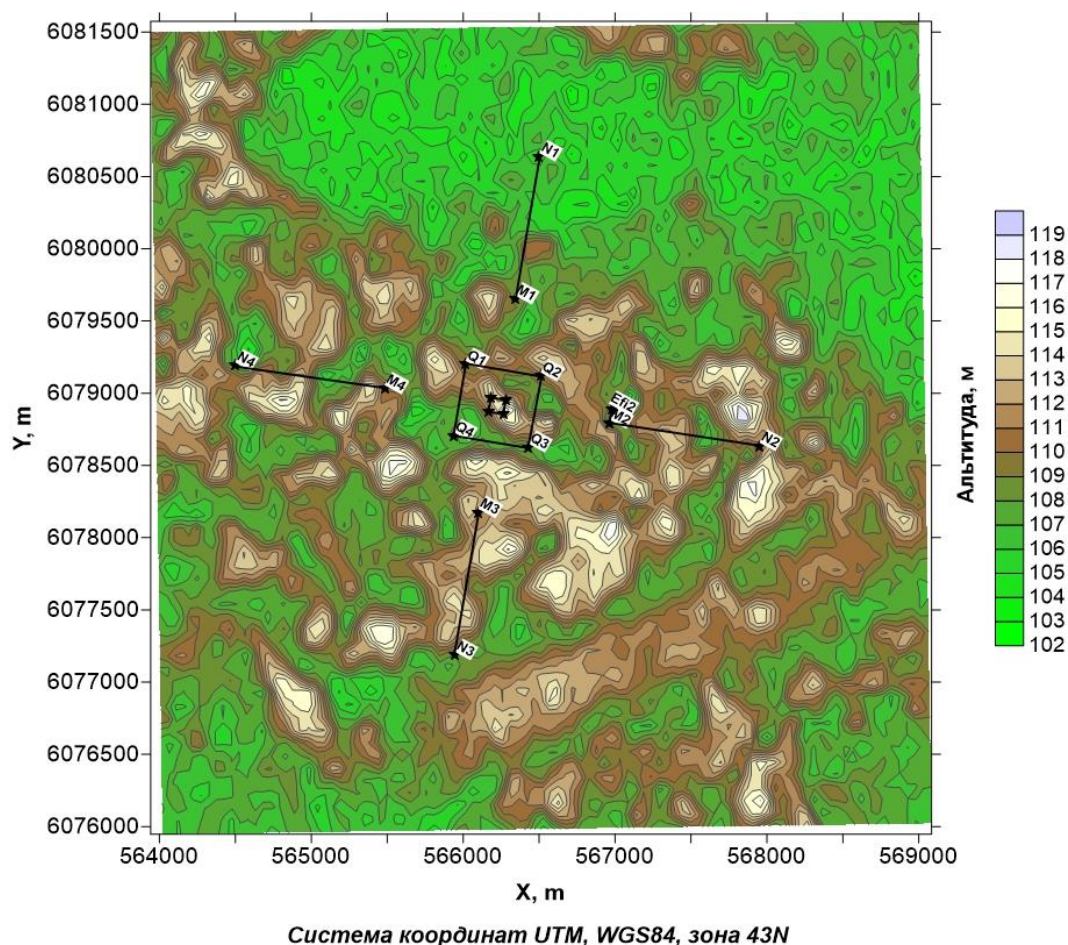


Рис. 3. Рельеф местности в районе исследований (построено по данным SRTM) и расположение на местности элементов экспериментальной установки

Fig. 3. Study area terrain (based on the SRTM) and experimental installation elements ground location

Поверхность Татарского района – типичная равнина со сглаженным грядным характером. Абсолютные высоты колеблются в пределах 106–113 м над уровнем моря, а пологие возвышенности чередуются с плавными понижениями (рис. 3). Довольно много блюдцеобразных западин, которые заняты озёрами и болотами. Под болотами занято 7 % территории района.

Татарская разведочная площадь расположена в южной части Западно-Сибирской низменности в пределах Обь-Иртышской впадины. Вблизи выбранного участка ранее проводился комплекс работ, включающий электроразведочные, сейсмические и гравиметрические измерения. Отчеты по этим работам были нами проанализированы с целью подтверждения горизонтально-слоистого строения выбранного участка.

Так, в отчете Барабинской экспедиции за 1948 г. «Геофизические исследования в центральной части Западно-Сибирской низменности» представлен сводный разрез по данным сейсмических и электроразведочных работ, проходящий в направлении Татарск–Барабинск. Разрез вполне горизонтально-слоистый (отражающие горизонты на глубине 500 и 1000 м в мезозойское являются пологозалегающими) вплоть до появления отражающего горизонта в палеозое на глубине 2200 м. Таким образом, мы можем предположить, что в районе проведения работ среда является горизонтально-слоистой, с пологозалегающими горизонтами вплоть до глубины 2200 м.

Схематический геологический профиль через Татарскую площадь, представленный в отчете по Татарской буровой партии, также показывает горизонтально-слоистый характер среды (рис. 4).

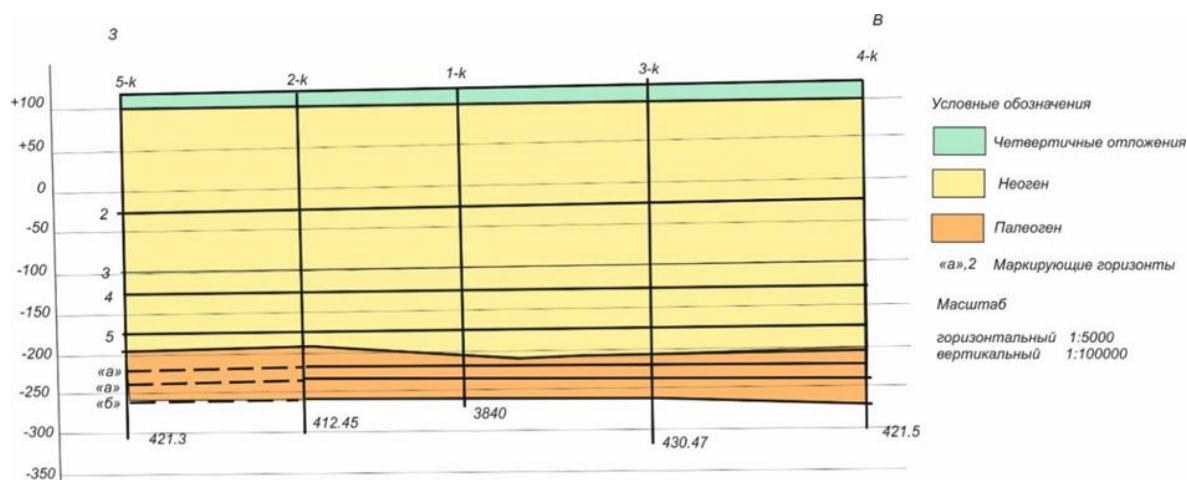


Рис. 4. Схематический геологический профиль через Татарскую площадь

Fig. 4. Schematic geologic profile across the Tatar area

Нами также были проанализированы кривые вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) Барабинской геофизической экспедиции, полученные вблизи г. Татарска. Ближайшие точки ВЭЗ (57, 58) находятся в 35 км к северо-востоку от участка исследований.

Следует добавить, что в рамках эксперимента были сделаны магнитотеллурические зондирования. Результаты МТЗ с точки зрения эффекта Холла будут обсуждаться в другой статье, однако они, между прочим, подтвердили горизонтально-слоистый характер разреза.

В результате, проинтерпретировав кривые ВЭЗ и МТЗ, а также сейсмические и гравиметрические данные, и детально изучив верхнюю часть разреза до глубины 2200 м вблизи участка исследований, можно сделать вывод о наличии нескольких слоев, практически субпараллельных друг другу, без резких вертикальных границ и с уверенностью говорить о горизонтально-слоистом характере среды на выбранном участке.

Расположение элементов экспериментальной установки

Схема расположения всех линий и генераторной петли показана на рис. 3. Видны порядковые номера линий MN и как они расположены относительно сторон света и центра генераторной петли. Генераторная

петля располагалась на ровной поверхности из провода марки ГПМП размером 500×500 м. Общее сопротивление петли было 8,6 Ом. Схема измерений 2018 г. состояла из следующих компонентов:

- 1) QQ – центр установки МТЗ, а также генераторной и измерительной петель 3СБ;
- 2) Q1Q2Q3Q4 – генераторная петля 3СБ (500×500 м);
- 3) Q5Q6Q7Q8 – измерительная петля 3СБ (100×100 м);
- 4) M1N1, M2N2, M3N3, M4N4 – измерительные линии 3СБ (1 км) для регистрации компоненты E_R ;
- 5) M2Efi2 – измерительная линия 3СБ (100 м) для регистрации компоненты E_ϕ .

Таблица 1. Координаты элементов экспериментальной установки

Table 1. Experimental installation elements coordinates

Элемент установки Installation element	Координата Coordinate		Элемент установки Installation element	Координата Coordinate	
	X	Y		X	Y
QQ	566223	6078912	M2	566963	6078791
Q1	566015	6079198	M3	566101	6078173
Q2	566508	6079118	M4	565483	6079030
Q3	566429	6078625	N1	566499	6080638
Q4	565936	6078705	N2	567949	6078633
Efi	566979	6078890	N3	565941	6077186
M1	566340	6079651	N4	564496	6079189

2018

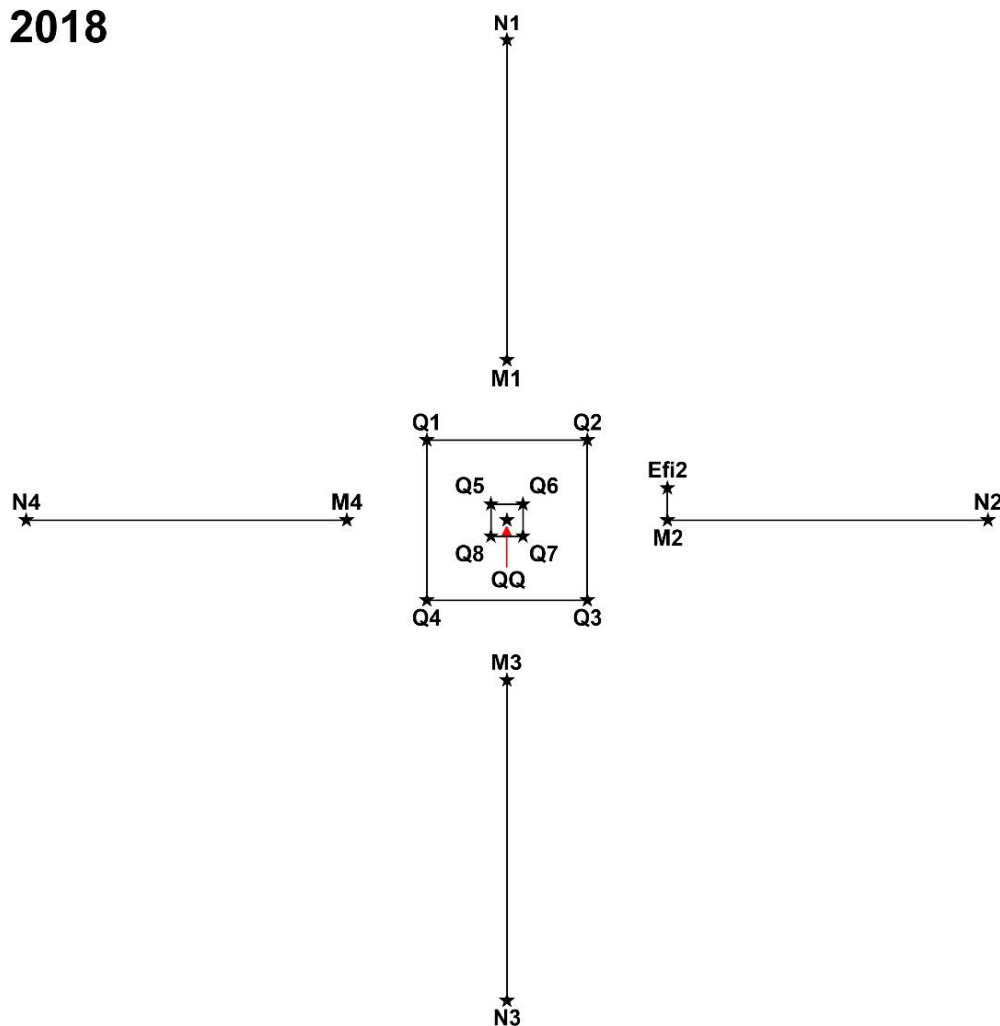


Рис. 5. Схема расположения на местности элементов экспериментальной установки
Fig. 5. Experimental installation elements ground location scheme

Все приемные линии располагались радиально, одинаково по отношению к петле и заземлялись свинцовыми неполяризуемыми электродами на расстоянии от центра 750 и 1750 м. Для соединения заземлений использовался телефонный сталебронный провод длиной 1000 м.

Расположение всех проводов на местности осуществлялось с использованием навигатора Garmin-64st, который обеспечивает точность позиционирования 1 м, поскольку работает с использованием как спутников GPS, так и спутников Глонасс и при соблюдении некоторых условий. Поскольку местность проведения работ открытая и слабозалесенная, то во время проведения работ количество одновременно видимых спутников было не менее 10, что также обеспечивало высокую точность позиционирования. Помимо использования навигатора все расстановки петель и линий MN контролировались вешками так, чтобы несколько вешек вдоль прокладки провода были видны и составляли одну линию. Таким образом, можно еще раз сказать, что максимальное отклонение расстановки петель и линий относительно запланированного не более 1 м. Угол расстановки петель и линий относительно направления на истинный

север составил 10° и был выбран из соображений максимальной прямой видимости и отсутствия залесенности вдоль линий и сторон петель для более точного расположения на местности.

Кроме основных измерений (источник – петля, и 4 измерительных линии MN) предусматривались важные дополнительные измерения соосной установкой ЗСБ. Измерительная петля для соосных измерений размером 100×100 м располагалась в центре генераторной петли и под тем же углом к сторонам света, что и измерительная. Кроме того, в точке M2 (750 м от центра петли) производилось измерение электрической компоненты E_ϕ посредством стометровой заземленной линии, параллельной стороне генераторной петли и перпендикулярно линии MN2. Значение этих дополнительных измерений мы поясним ниже.

На рис. 6 показан перепад высот на всех линиях и периметре генераторной петли. Самый большой перепад составил 6 м на общую длину 1000 м, что составляет менее половины градуса наклона линий. Таким образом, можно считать, что рельеф вносит очень малые искажения в сигналы ЗСБ, полученные в ходе исследований.

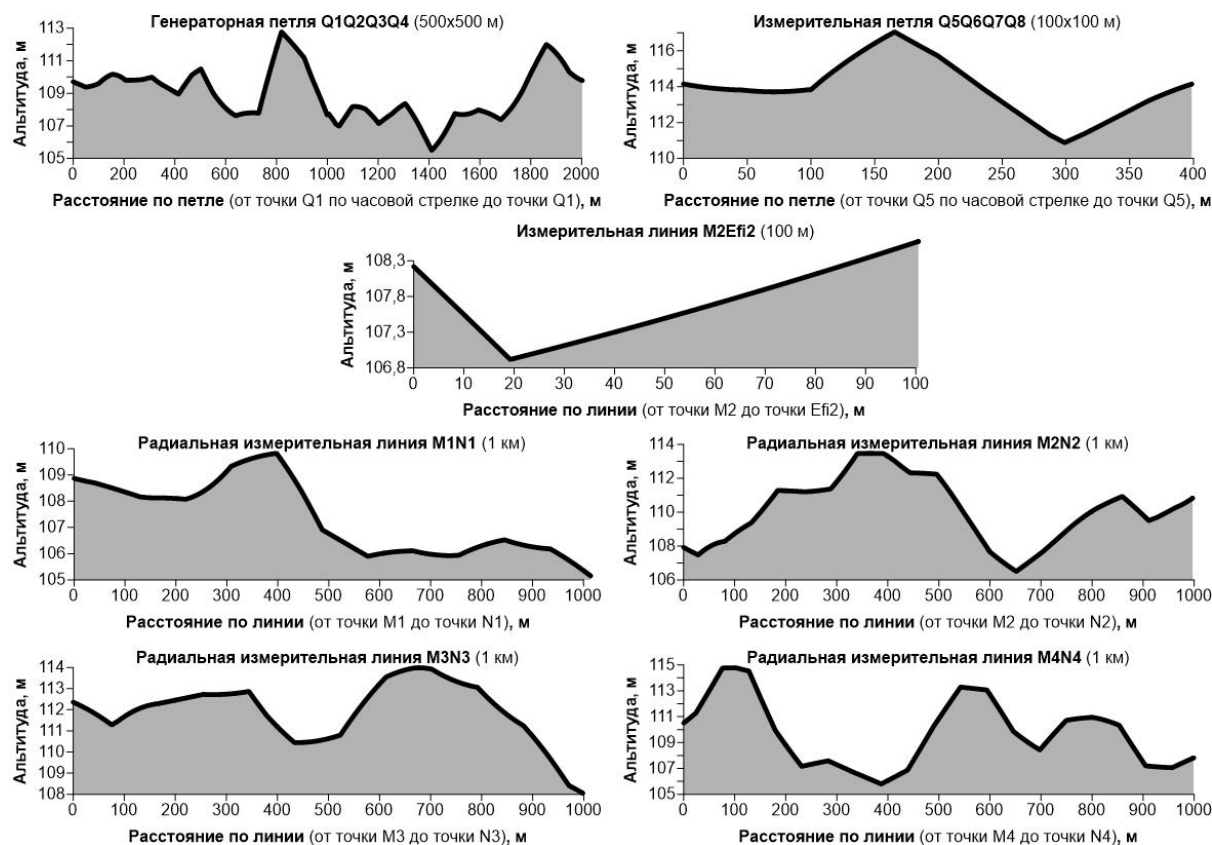


Рис. 6. Перепад высот на всех линиях MN и на периметре генераторной петли

Fig. 6. Height difference on all MN lines and on the generator loop perimeter

Аппаратура

Измерения методом ЗСБ осуществлялись двумя типами измерительной аппаратуры:

1. «Цикл-7» [20];
2. «FastSnap» [21].

Технические характеристики измерительных комплексов описаны по указанным ссылкам, но можно сказать, что это современные комплекты аппаратуры, позволяющие качественно измерять сигналы ЗСБ.

В качестве генераторной группы выступал коммутатор тока «Цикл-Т50» и блок управления коммутатором тока того же производства [20]. Синхронизация измерений осуществлялась посредством GPS.

Источником питания выступали автомобильные аккумуляторы, соединенные последовательно в количестве 9 штук, что обеспечивало ток в генераторной петле 11,5–12,5 А.

Для проведения измерений методом МТЗ использовалась стандартная аппаратура «MTU-5» фирмы Phoenix Geophysics (Канада) [22]. Аппаратура позволяет измерять на частотах от 300 до 0,0001 Гц.

Вспомогательные и основные исследования

Безусловно, основные измерения – переходный сигнал в электрических радиальных линиях при возбуждении импульсами тока в незаземленной петле – должны быть дополнены или предваряться различными стандартными геоэлектроманнитными экспериментами с целью изучения геоэлектрического разреза

для дальнейшего анализа и численного моделирования. Это даст инструменты для оценки качества измерений и оценки искомых сигналов, относящихся, предположительно, к проявлению эффекта Холла.

Прежде всего, с помощью подготовленной для основного эксперимента генераторной петли (500×500 м) и приемной петли (100×100 м) были произведены соосные сигналы ЗСБ. Это наиболее надежная методика зондирования становлением, результаты которой хорошо интерпретируются и позволяют установить одномерный геоэлектрический разрез. Были произведены регистрации процесса становления двумя измерителями – «Цикл-7» и «FastSnap», которые дали одинаковый результат. На рис. 7 представлена полевая кривая (аппаратура «Цикл-7») и теоретическая кривая для подобранной одномерной среды.

Таким образом, мы получили как результат интерпретации соосных сигналов ЗСБ следующую одномерную геоэлектрическую модель среды (табл. 2):

Таблица 2. Одномерный геоэлектрический разрез по данным ЗСБ

Table 2. 1D geoelectric section according to TEM method

Слой № Layer no.	Удельное электрическое сопротивление (УЭС), Ом·м Electrical resistivity (ER), Ohm·m	Мощность, м Thickness, m
1	10	24
2	7	357
3	4	791
4	15	∞

Мы должны понимать, что это одна из эквивалентных моделей даже в рамках ЗСБ. Другие геоэлектрические методы (МТЗ, ВЭЗ) могут показывать заметно отличающиеся параметры модели среды.

Основные измерения предполагалось производить с заземленных линий. Вообще, измерение электрических (с заземленных линий) сигналов в зондированиях становлением по сравнению с измерениями ЭДС от индуктивных датчиков имеет несколько проблем и становится менее надежным. Возникают трудности с заземлениями (электродами), с влиянием вызванной поляризации. Еще можно отметить специфические электромагнитные помехи и сложности с тестированием

измерителя. В нашем случае проблема усложняется неопределенностью и слабостью предполагаемых сигналов. Поэтому необходимо было проверить электрические измерения. Это можно сделать, если измерить нормальную, «штатную», компоненту устанавливающегося поля токовой петли, а именно компоненту E_ϕ .

Применим следующую процедуру контроля. Для среды, полученной как результат интерпретации соосных ЗСБ (табл. 2), мы можем рассчитать сигнал для короткой приемной электрической линии, перпендикулярной основной линии MN2 (рис. 5). Теперь сравним расчет с измеренным на практике сигналом.

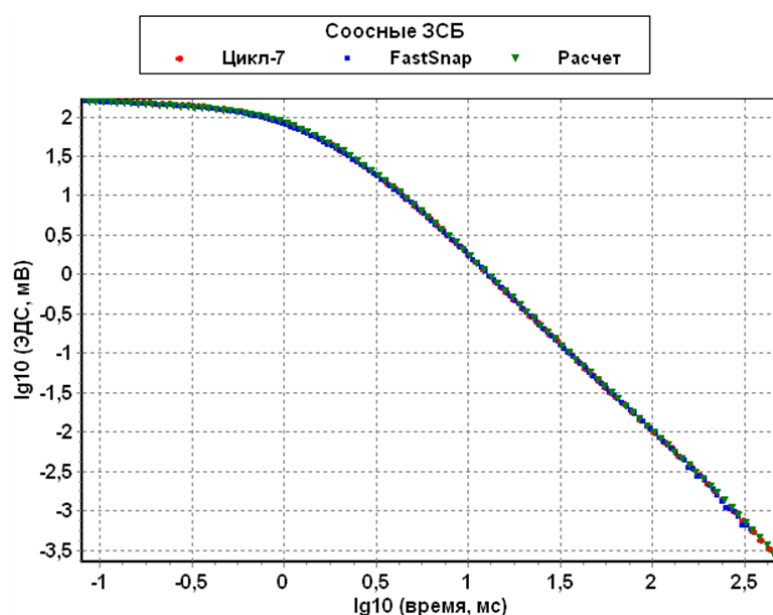


Рис. 7. Измеренная кривая соосных зондирований и теоретическая кривая для выбранного разреза
 Fig. 7. Measured coaxial sounding curve and theoretical curve for the selected section

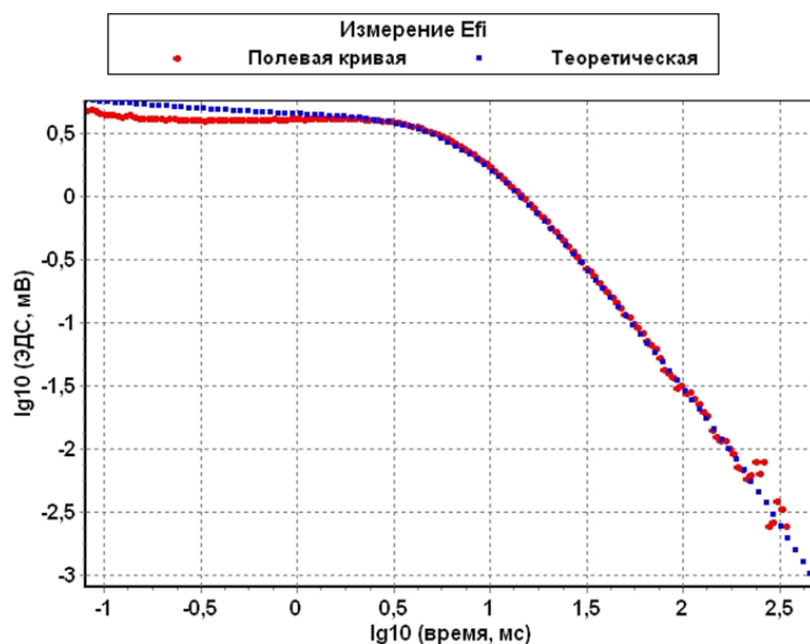


Рис. 8. Сравнение полевого и рассчитанного сигнала E_ϕ
 Fig. 8. Comparison between field and calculated signal E_ϕ

На рис. 8 показано это сравнение. Считаем, что это весьма удовлетворительный результат, подтверждающий адекватность наших электрических (от заземленных линий) измерений. Более того, мы подтвердили также интерпретацию сигнала ЗСБ как сигнала в одномерной среде именно с определенными выше параметрами, поскольку используем теперь сигналы (полевой и теоретический) на значительном удалении от центра петли (750 м). Не лишне также заметить, что не обнаруживается влияние других факторов, прежде всего, вызванной поляризации (ВП). Конечно, можно заметить расхождение на ранних временах. Может быть, нужно уточнить одномерную структуру верхней части разреза (ВЧР). Не исключено влияние небольших приповерхностных неоднородностей.

Анализ геолого-геофизической информации и вспомогательных зондирований, приведенный выше, показал, что мы действительно располагаемся на поверхности горизонтально-слоистой среды с определенными нами геоэлектрическими параметрами, и наши измерители сигналов с приемных заземленных линий адекватно на них реагируют. Рассмотрим, учитывая это, наши основные измерения.

Расположение элементов генераторно-измерительного комплекса приведено на рис. 3, 5 и в табл. 1. Данные о рельефе и точности расстановки мы также привели выше. Итак, нами были произведены измерения переходного сигнала с четырех радиальных линий от квадратной петли 500×500 м. Все линии расположены одинаково по отношению к петле и заземлялись на расстоянии от центра 750 и 1750 м. Абсолютно понятно, что мы хотели сопоставить сигналы всех четырех линий. По приведенным выше теоретическим представлениям, если магнитное поле считать вертикальным, сигналы должны совпадать. Все другие факторы – неоднородности, неточности в геометрии, дадут совершенно различные сигналы в разнонаправленных линиях. Конечно, имеется небольшая горизонтальная компонента магнитного поля Земли, но она слабо влияет на сигналы горизонтальных приемных линий.

Итак, на рис. 9 приведены устанавливающиеся сигналы со всех четырех линий (в логарифмическом масштабе). К сожалению, в течение работ резко ухудшалась погода (шторм, гроза, ливни), а наши временные и финансовые ресурсы были ограничены. Так что качество измерений далеко не однородно.

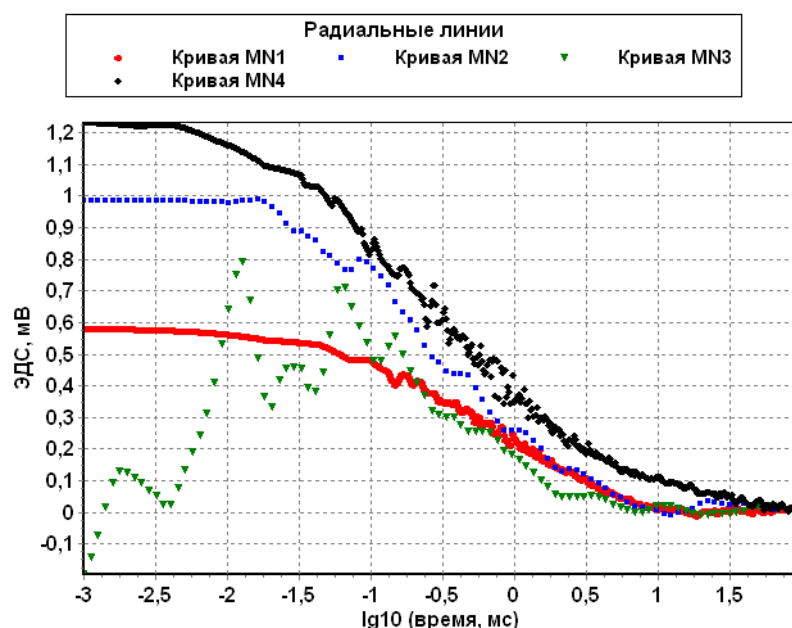


Рис. 9. Сигналы с четырех линий после обработки

Fig. 9. Four lines signals after preprocessing

Тем не менее мы склонны видеть в этих сигналах общую основу и оцениваем этот результат как положительный. Все-таки, мы имеем со всех линий примерно одинаковый сигнал, довольно определенный и не малый (около 0,5 мВ при токе в петле 12 А), что позволяет говорить о регистрации эффекта Холла в геологической среде. Выше мы описывали наши мероприятия для минимизации влияния латеральных неоднородностей среды (посредством тщательного выбора места проведения эксперимента) и искажений геометрии установки. Но если бы этих мероприятий оказалось недостаточно, то сигналы за счет этих факторов оказались бы совершенно различными, вклю-

чая и смену полярности, поскольку мы провели измерения в четырех различных направлениях. Мы моделировали влияние некоторых нарушений геометрии (первые метры) и получали значительные сигналы в линиях, но они были совершенно различными. Только искомый эффект может дать одинаковые сигналы в четырех радиальных направлениях от токовой петли.

Есть еще дополнительные соображения по поводу того, что сигналы все-таки довольно существенно различаются. Полностью одинаковыми сигналы должны бы быть, если поле Земли вертикально. Однако это не так, есть еще горизонтальная составляющая, направленная, примерно, с севера на юг. При-

помним здесь конфигурацию вторичного тока от петли и свойства векторного произведения. Эта горизонтальная компонента никак не взаимодействует с токами в этом же направлении, т. е. слабо влияет на сигналы широтных линий (MN2 и MN4), но значительно влияет на токи в широтном направлении, над которыми располагаются линии MN1 и MN3. Вот мы и видим, что сигналы с линий 2 и 4 близки между собой, а сигнал с линии MN1 ослаблен. К сожалению, о линии 3 судить определенно трудно.

Наконец, сравним полевые сигналы с теоретическим сигналом вследствие эффекта Холла, рассчитанным по формуле (5). На рис. 10 приведено такое сравнение (теперь в билогарифмическом масштабе). Теоретическая кривая, рассчитанная для $\sigma_H = 0,002$

См/м, в какой-то мере соответствует полевым кривым, и, таким образом, мы определили холловскую проводимость. На наш взгляд, мы положительным образом решили вопрос о проявлении эффекта Холла в электроразведке. Но, возможно, на взгляд читателя, результат не такой уж определенный. Хотя, странно было бы сразу получить абсолютно бесспорный факт, который долгое время не был замечен в электроразведке. Конечно же, это нуждается в подтверждении в дальнейших полевых исследованиях, поскольку холловский сигнал слаб, а измерения пока получились не самого лучшего возможного качества. В любом случае, мы не видим в результатах эксперимента ничего противоречащего нашей гипотезе о наблюдаемости эффекта Холла в электромагнитных зондированиях.

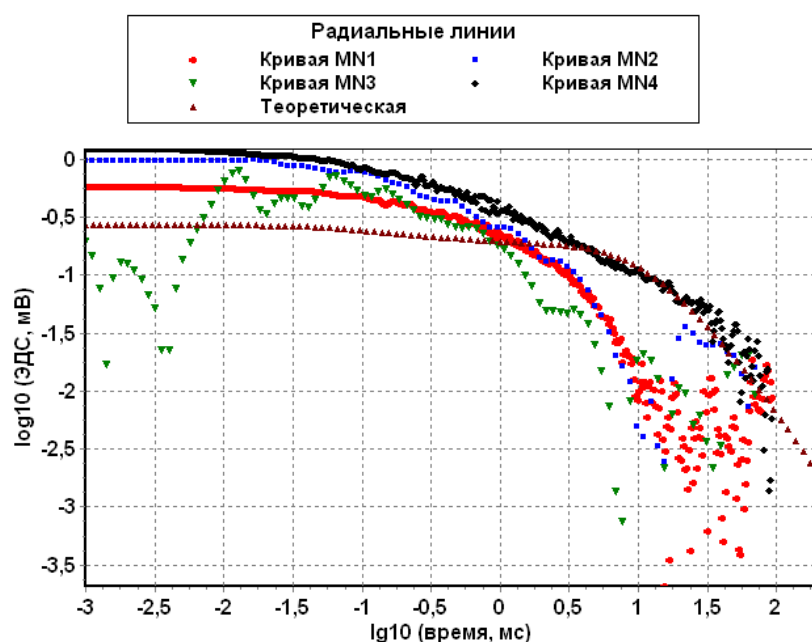


Рис. 10. Сравнение всех полевых сигналов с теоретическим для $\sigma_H = 0,002$ См/м

Fig. 10. Comparison between all field signals and the theoretical one for $\sigma_H = 0,002$ S/m

Заключение

Проведены первые целенаправленные полевые исследования с целью обнаружения эффекта Холла в геологической среде, и эта цель, по предварительным данным и мнению самих исследователей, достигнута. Получена оценка холловской проводимости около $2 \cdot 10^{-3}$ См/м. Однако мы понимаем, что обнаружение нового эффекта в геоэлектрике, его признание научной общественностью потребует дополнительных исследований и доказательств. Совершенно необходимо повторить измерения на том же участке со смещением и поворотом экспериментальной установки, а также увеличить объем дополнительных тестовых измерений. Необходимо добиться повышения качества измерений, и для этого явно есть возможности.

Как бы там ни было, значимость поднятой темы неоспорима, и тема эта будет, мы уверены, развивать-

ся. Следует только подчеркнуть ее важность и в практическом отношении. Эффект Холла позволяет ввести, по крайней мере, еще один новый геоэлектрический параметр. Этот параметр весьма тесно связан с вещественным составом среды. Конечно, определение этого параметра требует специальных электроразведочных методик, сигнал слаб. Например, использованная нами в описанной выше работе установка с токовой петлей и радиальными линиями – вынужденный по ресурсным соображениям выбор, который стал приемлемым только после тщательного выбора места и строгого выполнения геометрических требований. Нужны методики, где нормальный (от вмещающих пород) электродинамический фон отклика подавлен.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hall E.H. On a new action of the magnet on electric currents // American Journal of Mathematics. – 1879. – V. 2. – P. 287–292.
2. Beer A.C. Hall effect and the beauty and challenges of science // The Hall Effect and its Applications. – New York: Plenum Press, 1980. – P. 299–338.
3. Allgaier R.S. Some general input-output rules governing Hall coefficient behavior // The Hall Effect and its Applications. – New York: Plenum Press, 1980. – P. 375–397.
4. Herring C. Effect of random inhomogeneities on electrical and galvanomagnetic measurements // Journal of Applied Physics. – 1960. – V. 31. – № 11. – P. 1939–1953.
5. Juretschke H.J., Landauer R., Swanson J.A. Hall effect and conductivity in porous media // Journal of Applied Physics. – 1956. – V. 27. – № 7. – P. 838–839.
6. Cohen M.H., Jortner J. Effective medium theory for the Hall effect in disordered materials // Physical Review Letters. – 1973. – V. 30. – № 15. – P. 696–698.
7. Lei Tan Fu, Leu Len-Yi, Lee Chung Len. Specific contact resistivity measurement by a vertical Kelvin test structure // Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions. – 1987. – V. ED-34. – № 6. – P. 1390–1395.
8. De Mey G. Hall effect in a non-homogeneous magnetic field // Solid State Electron. – 1977. – V. 20. – № 2. – P. 139–142.
9. Komiyama S. A capacitive method for Hall effect measurement // Journal of Applied Physics. – 1981. – V. 25. – № 3. – P. 303–305.
10. Oswald J., Feichtinger H., Czaputa R. A useful method to improve convergence in least-squares fitting procedures // Physica Status Solidi. – 1984. – V. 81 (a). – № 1. – P. 343–351.
11. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. – М.: Недра, 1965. – 109 с.
12. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – М.: Наука, 1967. – 685 с.
13. Кучис Е.В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 621 с.
15. Гурьев В.А., Могилатов В.С., Потапов В.В. Участие в полевых экспериментах по выявлению эффекта Холла в геологической среде // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле. Материалы конференции. – Новосибирск, 19–23 ноября 2018. – С. 162–164.
16. Могилатов В.С., Потапов В.В., Горевячева А.А. Анализ и экспериментальное обнаружение гальваномагнитных явлений при зондированиях становлением // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XIV Международный научный конгресс. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Международная научная конференция. Сборник материалов в 6 т. – Новосибирск, 23–27 апреля 2018. – Т. 3. – С. 234–240.
17. Могилатов В.С., Плоткин В.В. Учет холловской проводимости в электромагнитных зондированиях Земли // Геомодель 2017: 19-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. Тезисы докладов. – Геленджик, 11–14 сентября 2017. – С. 43765 (6 с.)
18. Плоткин В.В., Могилатов В.С., Потапов В.В. Модификации метода Треффца для оценки вклада эффекта Холла при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. – № 3. – С. 420–432.
19. Плоткин В.В. Проявления эффекта Холла по результатам поляризационного анализа магнитотеллурического поля // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XIV Международный научный конгресс. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Междунар. науч. конф. Сборник материалов в 6 т. – Новосибирск, 23–27 апреля 2018. – Т. 4. – С. 61–67.
20. Захаркин А.К. Разработка аппаратурно-методического обеспечения импульсной индуктивной электроразведки для нефтепоисковых работ в условиях Сибирской платформы: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Новосибирск, 2000. – 26 с.
21. НПК «СибГеоСистемы». Станция электроразведочная FastSnap. Руководство по эксплуатации. – Новосибирск; Иркутск, 2007. – 12 с.
22. Phoenix Geophysics Ltd. V5 System 2000 MTU/MTU-A User Guide. – Toronto, 2010. – 193 p.

Поступила 31.05.2019 г.

Информация об авторах

Могилатов В.С., доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Потапов В.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Захаркин А.К., кандидат технических наук, главный геофизик ООО «Цикл Гео».

Гурьев В.А., лаборант лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Шеин А.Н., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 550.837

EXPERIMENTAL STUDY OF THE HALL EFFECT IN THE EARTH AT THE CONTROLLED SOURCE TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD

Vladimir S. Mogilatov¹,
mvecs@ya.ru

Vladimir V. Potapov¹,
potapovvv@ipgg.sbras.ru

Aleksandr K. Zaharkin²,
zaharkin@ngs.ru

Vladimir A. Gurev¹,
gurevva@ya.ru

Aleksandr N. Shein¹,
sheinan@ipgg.sbras.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 3, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² OJSC «Tsikl Geo», 24/1, of. 78, Nizhegorodskaya street, Novosibirsk, 630102, Russia.

In the period from 8 to 15 July 2018, the employees of the Laboratory of Geoelectricity of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS conducted field studies under the RFBR grant no. 17-05-00083 A. This effect should be very weak in all signals of controlled source transient electromagnetic method. The studies were carried out by the following electric prospecting methods: complex of electrical prospecting methods was chosen due to the methodical efficiency and relative simplicity of the work. Research problems: work area selection; measurement of transient electromagnetic signals by four radial MN lines for registration of E_R components, caused by the Hall effect; measurement of E_φ components for measurements control.

The relevance of the research is primarily caused by the fact that the galvanomagnetic effects (including the Hall effect), arising in crossed electric and magnetic fields, are well known in physics, but have not been studied in relation to the geological environment – this means that these effects are not yet accounted for affect the signals of geoelectromagnetic soundings.

The main aim of the research is to discover the Hall effect in the geological media.

Object: the Hall effect in the geological media.

Methods: controlled source transient electromagnetic method, magnetotelluric sounding method.

Results. The field studies in 2018 are the first purposeful field studies to detect the Hall effect in the geological environment by electromagnetic sensing methods. In researchers opinion, the goal of research, according to preliminary data, was achieved. The Hall conductivity was estimated at $\sim 1\text{--}2 \cdot 10^{-3}$ S/m.

Key words:

Electrical exploration, controlled source transient electromagnetic (TEM) method, geomagnetic field, Hall effect, Lorentz effect.

The study was performed with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project no. 17-05-00083 A.

REFERENCES

- Hall E.H. On a new action of the magnet on electric currents. *American Journal of Mathematics*, 1879, vol. 2, pp. 287–292.
- Beer A.C. Hall effect and the beauty and challenges of science. *The Hall Effect and its Applications*. New York, Plenum Press, 1980, pp. 299–338.
- Allgaier R.S. Some general input-output rules governing Hall coefficient behavior. *The Hall Effect and its Applications*. New York, Plenum Press, 1980, pp. 375–397.
- Herring C. Effect of random inhomogeneities on electrical and galvanomagnetic measurements. *Journal of Applied Physics*, 1960, vol. 31, no. 11, pp. 1939–1953.
- Juretschke H.J., Landauer R., Swanson J.A. Hall effect and conductivity in porous media. *Journal of Applied Physics*, 1956, vol. 27, no. 7, pp. 838–839.
- Cohen M.H., Jortner J. Effective medium theory for the Hall effect in disordered materials. *Physical Review Letters*, 1973, vol. 30, no. 15, pp. 696–698.
- Lei Tan Fu, Leu Len-Yi, Lee Chung Len. Specific contact resistivity measurement by a vertical Kelvin test structure. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions*, 1987, vol. ED-34, no. 6, pp. 1390–1395.
- De Mey G. Hall effect in a non-homogeneous magnetic field. *Solid State Electron*, 1977, vol. 20, no. 2, pp. 139–142.
- Komiyama S. A capacitive method for Hall effect measurement. *Journal of Applied Physics*, 1981, vol. 25, no. 3, pp. 303–305.
- Oswald J., Feichtinger H., Czaputa R. A useful method to improve convergence in least-squares fitting procedures. *Physica Status Solidi*, 1984, vol. 81 (a), no. 1, pp. 343–351.
- Vanyan L.L. *Osnovy elektromagnitnykh zondirovaniy* [Electromagnetic sensing fundamentals]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 109 p.
- Ginzburg V.L. *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln v plazme* [Electromagnetic waves propagation in plasma]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 685 p.
- Kuchis E.V. *Galvanomagnitnye efekty i metody ikh issledovaniya* [Galvanomagnetic effects and their investigation methods]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1990. 264 p.
- Landau L.D., Lifshic E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Continuous media electrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 621 p.

15. Gurev V.A., Mogilatov V.S., Potapov V.V. Uchastie v polevykh eksperimentakh po vyyavleniyu effekta Kholla v geologicheskoy srede [Participation in field experiments to identify the Hall effect in the geological environment]. *IX Sibirskaya konferentsiya molodykh uchenykh po naukam o Zemle* [IX Siberian conference of young scientists in earth sciences]. Novosibirsk, November 19–23, 2018. pp. 162–164.
16. Mogilatov V.S., Potapov V.V., Goryavcheva A.A. Analiz i eksperimentalnoe obnaruzhenie galvanomagnitnykh yavleniy pri zondirovaniyakh stanovleniem [Analysis and experimental detection of galvanomagnetic phenomena in TEM]. *Interexpo GEO-Sibir. XIV Mezhdunarodny nauchny congress. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. Nedropolzovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Ekonomika. Geoekologiya. Sbornik materialov* [Interexpo GEO-Siberia. XIV International scientific congress. International scientific conference. Subsoil use. Mining. Directions and technologies of search, exploration and development of mineral deposits. Economy. Geoecology. Conference materials]. Novosibirsk, April 23–27, 2018. Vol. 3, pp. 234–240.
17. Mogilatov V.S., Plotkin V.V. Uchet khollovskoy provodimosti v elektromagnitnykh zondirovaniyakh Zemli [Accounting for the Hall conductivity in the electromagnetic sounding of the Earth]. *Geomodel 2017: 19 konferentsiya po voprosam geologorazvedki i razrabotki mestorozhdeniy nefiti i gaza. Tezisy dokladov* [Geomodel 2017: 19th Conference on exploration and development of oil and gas deposits. Abstracts]. Gelendzhik, September 11–14, 2017. p. 43765 (6 p.).
18. Plotkin V.V., Mogilatov V.S., Potapov V.V. Modifications of the Trefftz Method for Estimating the Contribution of the Hall Effect on Magnetotelluric Sounding. *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60, no. 3, pp. 357–367.
19. Plotkin V.V. Proyavleniya effekta Kholla po rezultatam polyarizatsionnogo analiza magnitotelluricheskogo polya [Hall effect manifestations based on the results of polarization analysis of the magnetotelluric field]. *Interexpo GEO-Sibir. XIV Mezhdunarodny nauchny congress. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. Nedropolzovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Ekonomika. Geoekologiya. Sbornik materialov* [Interexpo GEO-Siberia. XIV International scientific congress. International scientific conference. Subsoil use. Mining. Directions and technologies of search, exploration and development of mineral deposits. Economy. Geoecology. Conference materials]. Novosibirsk, April 23–27, 2018. Vol. 4, pp. 61–67.
20. Zakharkin A.K. *Razrabotka apparaturno-metodicheskogo obespecheniya impulsnoy induktivnoy elektrorazvedki dlya neftepoiskovykh rabot v usloviyakh Sibirskoy platformy*. Avtoreferat Dis. kand. nauk [Development of hardware and methodological support of pulse inductive electric prospecting for oil prospecting works in the conditions of the Siberian platform. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2000. 26 p.
21. *NPK «SibGeoSistemy». Stantsiya elektrorazvedchnaya FastSnap. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [RPC «SibGeoSystems». FastSnap electric exploration station. User manual]. Novosibirsk, Irkutsk, 2007. 12 p.
22. *Phoenix Geophysics Ltd. V5 System 2000 MTU/MTU-A User Guide*. Toronto, 2010. 193 p.

Received: 31 May 2019.

Information about the authors

Vladimir S. Mogilatov, Dr. Sc., chief researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Vladimir V. Potapov, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Aleksandr K. Zaharkin, Cand. Sc., chief geophysicist, OJSC «Tsikl Geo».

Vladimir A. Gurev, laboratorian, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Aleksandr N. Shein, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.