

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА ПРОЦЕСС УСТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

В.С. Могилатов^{1,2}, В.В. Потапов^{1,2}, А.Н. Шенин¹, В.А. Гурьев^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

Разработана математическая модель влияния магнитного поля Земли (геофизического эффекта Холла) на результаты зондирования становлением поля в ближней зоне искусственного источника (ЗСБ).

Для обнаружения эффекта при ЗСБ предложена схема специального эксперимента с источником типа токовой петли с импульсным возбуждением и регистрацией сигналов радиальными приемными линиями при одинаковых положениях относительно петли.

Проведены специальные полевые эксперименты в 2018 и 2019 гг. в Татарском районе Западно-Сибирской низменности для обнаружения вклада эффекта Холла в ЗСБ. Для обнаружения эффекта Холла основные измерения сигналов выполнены на четырех радиальных линиях от квадратной петли 500×500 м. По результатам ЗСБ после обработки, направленной на повышение качества сигналов и уменьшения влияния помех, сигналы с радиальных линий оказались примерно одинаковыми, что по теоретическим представлениям возможно лишь вследствие влияния эффекта Холла. Сравнение полевых сигналов с теоретическими оценками величины эффекта позволило также получить оценки холловской проводимости ~0.002 См/м.

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

INFLUENCES OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD ON THE TRANSIENT ELECTROMAGNETIC PROCESS IN THE GEOELECTRIC FIELD: AN EXPERIMENTAL STUDY

V.S. Mogilatov, V.V. Potapov, A.N. Shein, V.A. Gur'ev

A mathematical model of the influence of the Earth's magnetic field (the Hall effect) on results of the controlled source transient electromagnetic (TEM) method has been elaborated. For identification of this effect, we propose a schematic layout of the experimental grounded system with a pulsed loop source and signals recording by radial receive lines equally spaced relative to the loop. The 2018–2019 special field experiments were conducted in the Tatar region of the West Siberian Lowland with an aim to estimate the Hall effect contributions to the TEM method. To detect the Hall effect, transient electromagnetic responses were measured mainly by four receive lines radiating from a 500×500 m square loop. Analysis of the TEM results processing aimed at improving the signal quality and reducing the interference revealed a great similarity in signals from the radial lines, which is theoretically possible only under the Hall effect. Comparison of the field signals with the theoretical ones enabled estimation of the components caused by the Hall effect, in particular, conductivity at ~0.002 S/m.

Electrical prospecting, controlled source transient electromagnetic (TEM) method, geomagnetic field, Hall effect

ВВЕДЕНИЕ

В принципе, существует взаимодействие между токами, возникающими в геоэлектромагнитных полях, и магнитным полем Земли, и это базируется на эффекте и силе Лоренца. Как известно, сила Лоренца проявляется в воздействии стороннего магнитного поля на движущиеся заряженные частицы и, следовательно, на электрический ток. Сила направлена поперек магнитному полю и поперек направлению движения заряженных частиц (поперек току). Это весьма реальный физический феномен. Если электрический ток заключен в линейный проводник (т. е. в провод), то сила Лоренца передается на тело проводника, и именно поэтому вращаются наши стиральные машины. Если проводник достаточно объемный (проводящий «брусок»), то возникает поперечная к направлению стороннего магнитного поля и к направлению тока электродвижущая сила. В этом случае мы говорим об эффекте Холла. Наконец, в неограниченном проводнике (проводящая геологическая среда) также возникает поперечная ЭДС, если

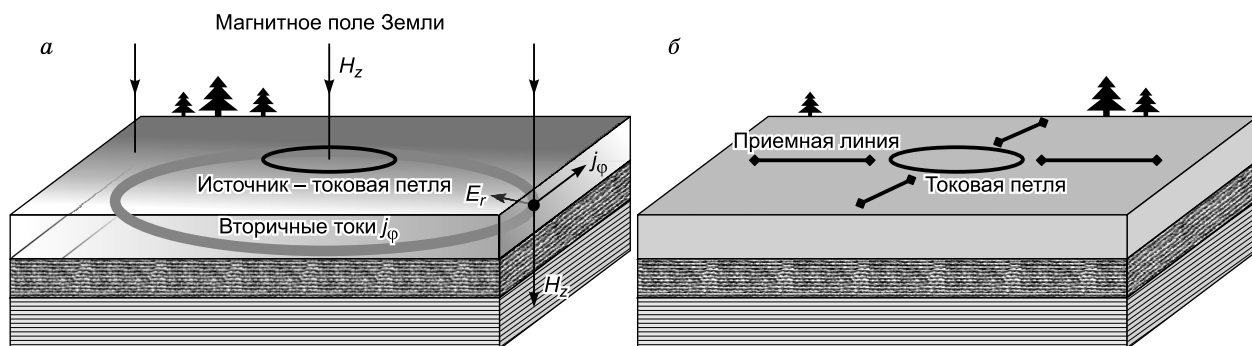


Рис. 1. Появление холловской напряженности (E_r) электрического поля (а) и экспериментальная установка для ее обнаружения (б).

есть какие-то токи (природные или искусственные), а стороннее магнитное поле есть всегда — магнитное поле Земли. Проблема состоит только в установлении реального проявления этого фактора в геоэлектromагнитных зондированиях. Самый первоначальный анализ показывает, что это может проявляться в эффективной анизотропии проводимости горных пород, вызванной силой Лоренца и эффектом Холла. Понятно, что эффект весьма слаб, поскольку до сих пор не обнаружился и не обсуждался (за исключением наших же предположений о возможных проявлениях эффекта в электроразведке [Могилатов, 2013]). По нашему мнению, наиболее подходящей экспериментальной основой для обнаружения влияния магнитного поля Земли на сигналы в геоэлектрике является метод зондирования становлением электромагнитного поля (ЗС), как наиболее чувствительный.

Рассмотрим простую ситуацию — процесс становления от горизонтальной токовой петли в горизонтально-слоистой среде. Примем, что магнитное поле Земли вертикально (рис. 1, а). Вторичные токи соосны генераторной петле, и в этом случае, в результате действия силы Лоренца, возникает электродвижущая сила, направленная по радиусу. Таким образом, предлагается простая экспериментальная схема (см. рис. 1, б). На выбранном участке с ровной поверхностью и горизонтально-слоистым разрезом (насколько это известно) располагается источник — токовая петля с импульсным возбуждением. Дополнительный, «холловский» сигнал регистрируется радиальной приемной линией при четырех одинаковых ее положениях относительно петли. В то же время при таком положении приемных линий нормальный сигнал становления, как известно, отсутствует, так же как и сигнал вызванной поляризации (ВП).

Идея проста, но специалисту понятно, что мы предлагаем схему метода чистой аномалии, которая всегда содержит массу подводных камней. Любое нарушение геометрии установки или горизонтальной однородности разреза приведет к появлению значительных сигналов, возможно, превышающих искомые. Заверяем читателей, что мы имели в виду эту проблему при проведении полевых экспериментов, и будем обсуждать это ниже. Однако сразу укажем на весьма важный критерий, который поможет установить природу сигналов. Искомые сигналы, связанные с магнитным полем Земли, во всех четырех линиях должны быть одинаковыми в силу симметрии, в то время как все мыслимые нарушения дадут совершенно различные сигналы в четырех разнонаправленных приемных линиях. Это кажется очевидным, но мы продемонстрируем это посредством трехмерного математического моделирования.

Еще надо пояснить, что мы уже имеем отрицательный опыт публикации результатов исследований по проблеме влияния магнитного поля Земли. Отклоненные статьи имели больше умозрительный характер с включением некоторых полевых фактов. Несмотря на эмоции, мы вполне понимаем, что, претендуя на выявление нового эффекта в геоэлектрике, должны предъявить самые серьезные обоснования своим результатам. При поддержке Российского фонда фундаментальных исследований мы, наконец, смогли летом 2018 г. провести специальные полевые эксперименты в Новосибирской области, а в 2019 г. повторили их, подтвердили и дополнили. Таким образом, надеемся, что мы существенно повысили уровень аргументации.

ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Место проведения экспериментов. 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).

Рис. 2. Схема установки на первом участке с четырьмя линиями для регистрации компоненты E_r и одной линией для регистрации компоненты E_φ .

Система координат (WGS84, UTM, zone 43N).

После рекогносцировочных выездов было выбрано место в Татарском районе Новосибирской области недалеко от пос. Орловка. Местность характеризуется ровным рельефом. 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, по предварительному анализу необходимые условия были максимально подготовлены. Кроме того, в ходе полевых работ уже нашими собственными электроразведочными средствами проверялась горизонтально-слоистая структура среды.

Расположение элементов экспериментальной установки. Схема расположения всех линий и генераторной петли на первом участке показана на рис. 2 (центр установки: 54.583° с.ш., 76.0314° в.д.). Генераторная петля выкладывалась на ровной поверхности из провода марки ГПМП размером 500×500 м. Все приемные линии расположены радиально, одинаково по отношению к петле и заземлялись неполяризуемыми электродами на расстоянии от центра 750 и 1750 м. По мере условий на местности, мы постарались расположить петлю и приемные линии в направлениях север—юг и восток—запад. Для соединения заземлений использовался телефонный сталемедный провод длиной 1000 м.

Аппаратура. Измерения методом зондирования становлением (ЗС) осуществлялись двумя типами измерительной аппаратуры: 1) комплекс Цикл-7 (г. Новосибирск), 2) FastSnap (г. Иркутск). В качестве генераторной группы выступал коммутатор тока Цикл-Т50 (г. Новосибирск) и блок управления коммутатором тока того же производства. Синхронизация измерений осуществлялась посредством GPS. Питание петли — от аккумуляторов (11.5—12.5 А).

Вспомогательные исследования и среда. Прежде всего, с помощью подготовленной для основного эксперимента генераторной петли (500×500 м) и приемной петли (100×100 м) (см. рис. 2) были проведены соосные зондирования ЗСБ. Регистрировался процесс становления двумя измерителями — Цикл-7 и FastSnap, которые дали одинаковый результат. Таким образом, мы получили как результат интерпретации соосных зондирований ЗСБ одномерную геоэлектрическую модель среды, представленную в таблице.

Основные измерения предполагалось производить с заземленных линий. Необходимо было проверить электрические измерения. Это можно сделать, если измерить нормальную, «штатную» компоненту устанавливающегося поля токовой петли, а именно, компоненту E_φ (см. рис. 2). Применим следующую процедуру контроля. Для среды, полученной как результат интерпретации соосных ЗСБ (см. таблицу), мы можем рассчитать сигнал для короткой приемной электрической линии, перпендикулярной основной линии. Теперь сравним расчет с измеренным на практике сигналом (рис. 3). Видно, что сигналы совпадают, и это весьма удовлетворительный результат, подтверждающий адекватность наших электрических (от заземленных линий) измерений. Более того, мы подтвердили также интерпретацию сигнала соосных ЗСБ как сигнала в одномерной среде именно с определенными выше параметрами, поскольку используем теперь сигнала

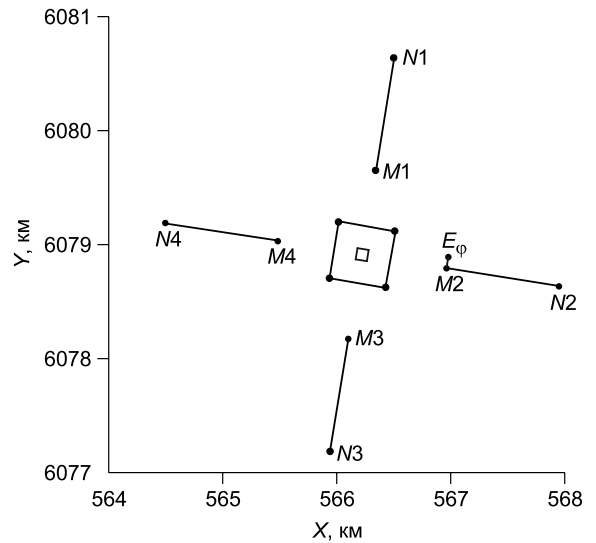
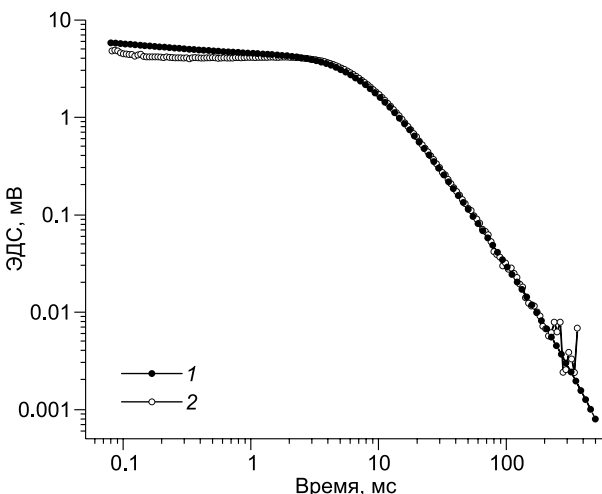


Рис. 3. Сравнение теоретического (1) и полевого (2) сигналов становления компоненты E_φ на первом участке.

1D геоэлектрический разрез по данным ЗСБ

№ п/п	УЭС, Ом·м	Мощность, м
1	10	24
2	7	357
3	4	791
4	15	∞

лы (полевой и теоретический) на значительном удалении от центра петли (750 м). На ранних временах, может быть, нужно уточнять одномерную структуру верхней части разреза.

ОСНОВНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ 2018 г.

На рисунке 4 приведены устанавливающиеся сигналы со всех четырех линий, измеренные в 2018 г. Это вполне заметные сигналы в контексте электроразведки ЗС. На графиках ЭДС приведена на 1 А в источнике. Поскольку ток в импульсе достигал 12 А, то, следовательно, сигналы в начале установления были порядка 1 мВ. К сожалению, в течение работ 2018 г. резко ухудшалась погода (шторм, гроза, ливни, а наши временные и финансовые ресурсы были ограничены, поэтому качество измерений далеко не однородно. Тем не менее считаем результат положительным. Главное — сигналы одинаковы с четырех линий. Конечно, как видим, одинаковы только в какой-то мере. Чтобы показать, что мы имеем в виду, определяя их как одинаковые, приведем результаты трехмерного моделирования сигналов [Иванов и др., 2009] в этих четырех линиях в присутствии неоднородности (рис. 5). Вот эти сигналы — неодинаковые! Они отличаются радикально не только от наших сигналов, но и между собой, качественно и количественно. Поскольку источник сигналов — погруженная неоднородность, то становление начинается с нулевого уровня.

Конечно, мы провели более обширное моделирование с разными неоднородностями, и можем уверенно заявить, что наши полевые сигналы не связаны с неоднородностью разреза. Впрочем, неоднородности и нет на месте проведения эксперимента, как подтверждают анализ архивных геолого-геофизических данных и наши вспомогательные измерения.

ИЗМЕРЕНИЯ 2019 г. И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты 2018 г. были обнадеживающими, но, конечно, недостаточными. Было решено в 2019 г. продолжить эксперименты на том же месте, чтобы проверить повторяемость сигналов. Полевые работы удалось провести в более значительных объемах. Во-первых, были повторены прошлогодние измерения

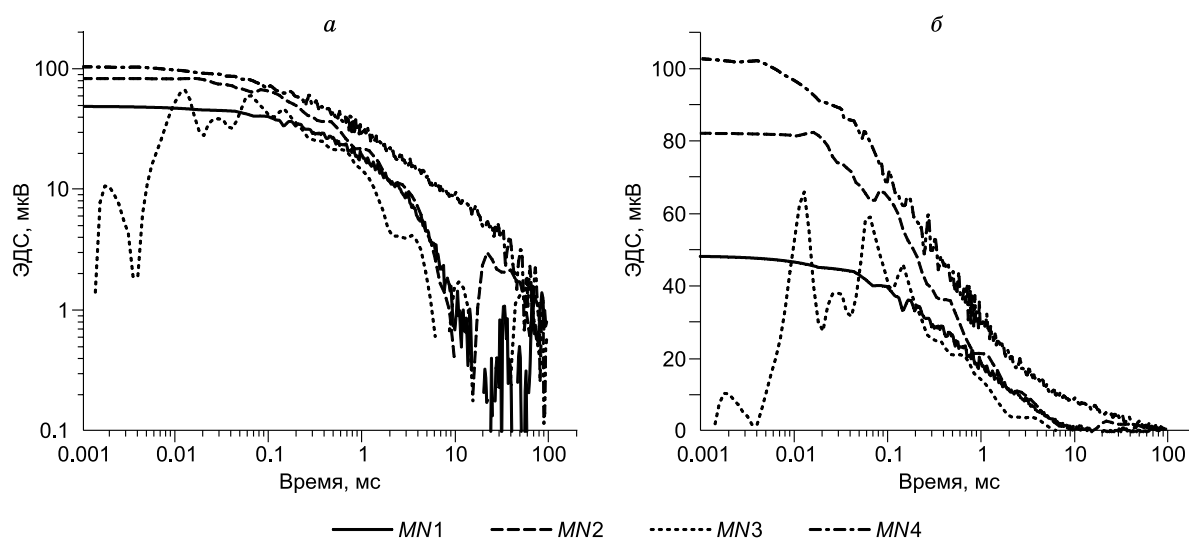


Рис. 4. Кривые сигналов становления компоненты поля E_z в четырех радиальных линиях на первом участке в 2018 г.

В билогарифмическом (а) и линейном (б) масштабе.

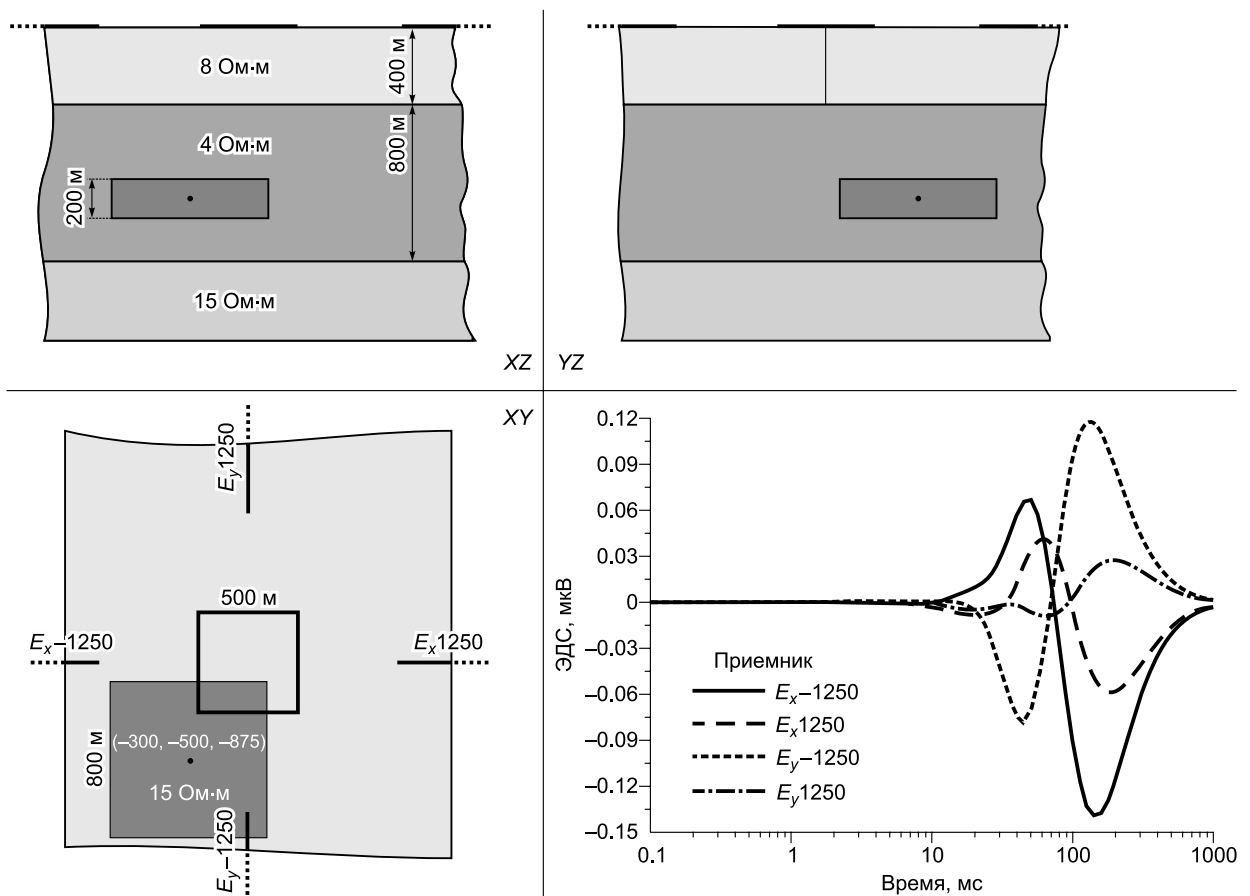


Рис. 5. Кривые сигналов становления в четырех радиальных линиях в присутствии локальной неоднородности.

в точности на том же месте с независимой раскладкой установки. Во-вторых, были проведены измерения на втором участке с переносом всей установки на несколько километров и некоторым поворотом (центр установки: 54.952° с.ш., 76.114° в.д.). В-третьих, проведены более обширные, нежели в 2018 г., вспомогательные измерения нормальной тангенциальной электрической компоненты (E_θ) вблизи внутренних концов всех четырех основных радиальных приемных линий и сделаны малоглубинные ЗСБ на внешних концах приемных линий с целью более тщательного исследования горизонтальной однородности среды.

Теперь обсудим основные результаты в совокупности, конечно, с результатами 2018 г. На рисунке 6 представлены новые сигналы с четырех приемных линий на первой точке, где повторялась расстановка 2018 г., и сигналы на второй точке. Хотя сигналы несколько изменились на второй точке, но можно признать, что они имеют устойчивый повторяющийся характер и реальны.

Покажем сопоставление сигналов 2018 и 2019 гг. на первой точке в принятом в ЗС билогарифмическом масштабе (рис. 7, а) и в логарифмическом масштабе по времени (рис. 7, б).

Итак, сигналы весьма значительны. На рисунках 6 и 7 приведены значения на 1 А тока источника при токе в генераторной петле 12 А. Поясним для тех, кто не знаком с характером сигналов в ЗС, что эти сигналы всегда осложнены электромагнитными помехами, естественными и промышленными, систематическими и случайными, а также импульсными. При измерениях производится накопление сигнала путем многократного повторения импульсного воздействия на среду, а также принимаются различные меры против систематических помех (например, против промышленной помехи 50 Гц). Сигналы также дублируются (обычно делается три дубля). Так что весьма негладкий вид сигналов на рисунках 6 и 7 для нас вполне обычен, и мы можем только повторить, что сигналы 2019 г. вполне повторяют сигналы 2018 г., и сигналы со всех четырех линий примерно (в рамках ЗС) одинаковы. Что, по нашим понятиям, это возможно, если объяснять природу сигналов именно так, как мы предлагаем.

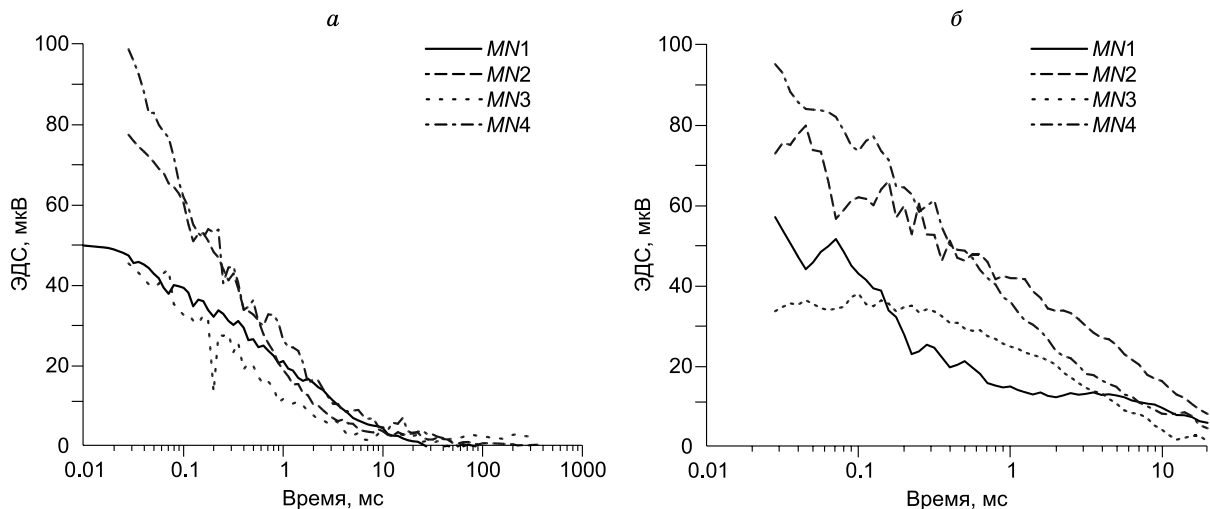


Рис. 6. Сравнение кривых сигналов становления в четырех радиальных линиях MN в 2019 г.:

a — на первом участке, *б* — на втором участке.

Однако теперь по совокупности всех сигналов отметим и основную разницу в сигналах. А именно, сигналы можно разделить на две группы — сигналы от «широтных» приемных линий (с четными индексами — 2, 4) и сигналы от «долготных» линий (1, 3). В первой группе уровень сигналов заметно выше. Качественно это можно объяснить опять-таки влиянием магнитного поля Земли. До сих пор мы принимали во внимание только вертикальную компоненту, но на нашей широте имеется значительная горизонтальная компонента (наклонение примерно 70°) [Magnetic field..., 2020], составляющая около 30 % от амплитуды магнитного поля. Вот ее воздействие на круговые вторичные токи от петли различно в зависимости от географической ориентации токов. Эта горизонтальная компонента, направленная с севера на юг, не взаимодействует с токами в том же направлении и воздействует на токи в широтном направлении (рис. 8). Таким образом, сигналы с «широтных» линий (четных) действительно должны отличаться от сигналов «долготных» (нечетных) линий. Получается, что четкое разделение сигналов по географическому признаку является серьезным аргументом в пользу «холловского» происхождения зафиксированных нами сигналов.

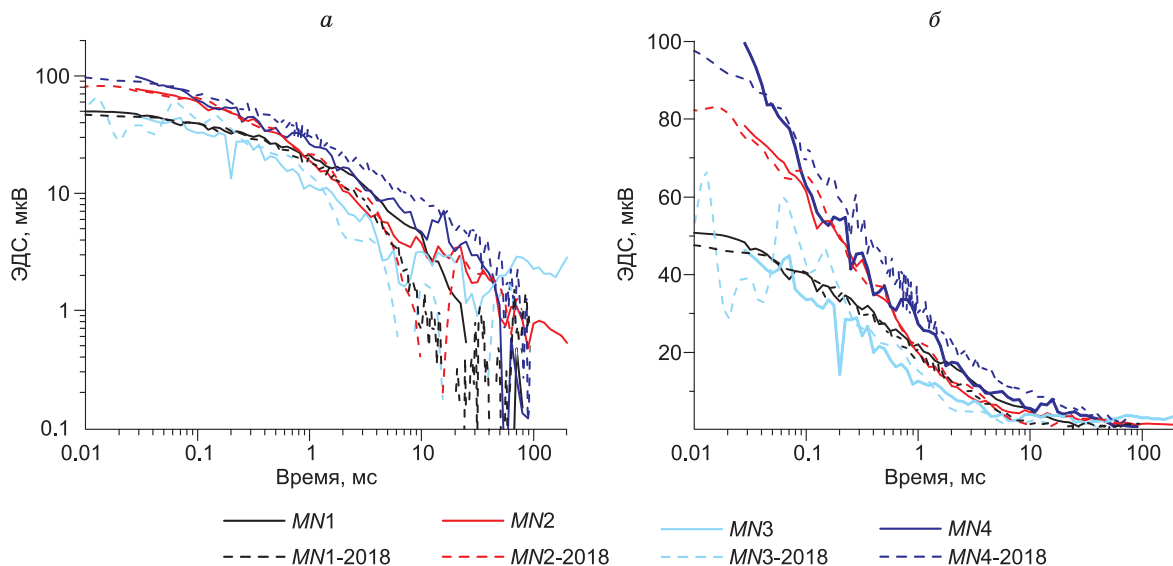


Рис. 7. Сравнение кривых сигналов становления в четырех радиальных линиях MN в 2018 и 2019 гг. на первом участке:

a — билогарифмическая шкала, *б* — логарифмическая шкала.

Рис. 8. Источник (петля), вторичные токи и горизонтальная составляющая магнитного поля Земли.

ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выше мы стремились быстрее показать основные результаты, и только вскользь упоминали о предпринятых нами мерах по обеспечению правильной геометрии установки и по анализу возможного влияния неоднородностей среды. Без таких мероприятий основные результаты окажутся под вопросом. На самом деле мы проделали обширную работу в этом направлении в поле и посредством математического моделирования.

Расположение всех проводов на местности осуществлялось с помощью навигатора «Garmin 64st», который обеспечивает точность позиционирования 1 м, так как работает с использованием спутников GPS и «Глонасс». 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. Как показала практика при независимой разметке и раскладывании генераторной петли и линий *MN* в 2019 г. на той же точке, расхождения с прошлогодней раскладкой (от которой остались слабые следы) были не более 1 м. Таким образом, можно еще раз сказать, что максимальное отклонение расстановки петель и линий относительно запланированного не более 1 м.

Мы привлекли математическое моделирование сигналов установления при некоторых отклонениях раскладки приемных линий в пределах 1 м для модели слоистой среды, восстановленной в результате индукционных измерений (см. таблицу). Результаты представлены на рис. 9. Как видим (представлена ЭДС на 1 А), сигналы слабы и не представляют проблемы для основных измерений.

Тем не менее мы провели в поле довольно большой объем измерений, сознательно нарушая правильную расстановку. В основном это состояло в перемещении мест заземления на несколько метров вправо и влево от установленного положения. Такие перемещения дальних заземлений приемных линий никак не влияли на принимаемый сигнал. Но перемещения ближних концов явно искажали сигнал (рис. 10, а). Для всех линий видна закономерность изменения сигналов. При отнесении заземления на 10 м мы имеем самый большой положительный сигнал. При уменьшении искажения уменьшается сиг-

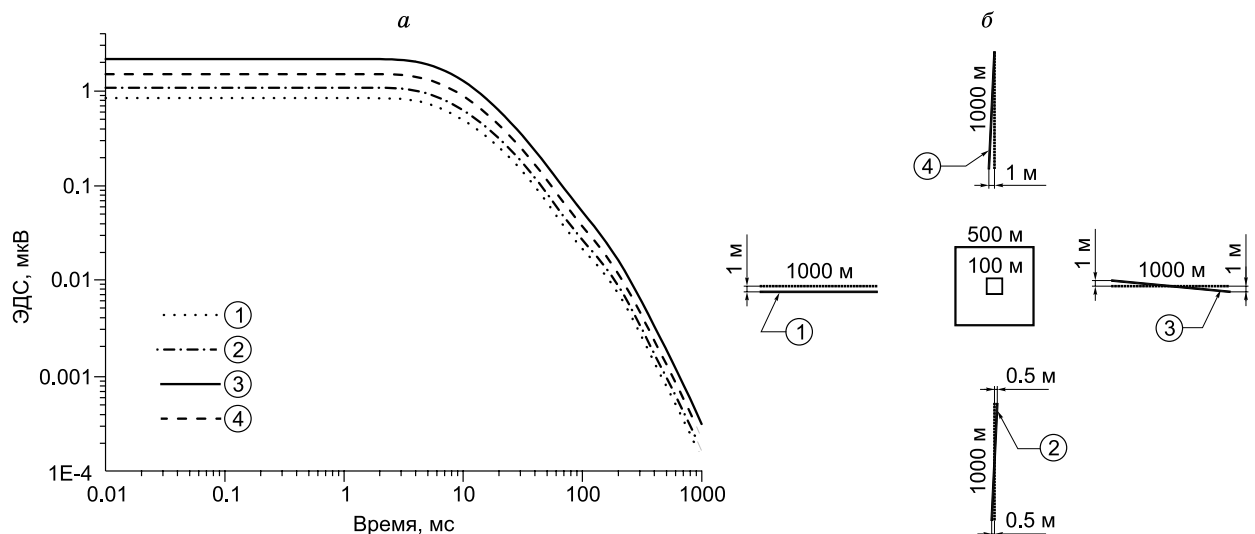
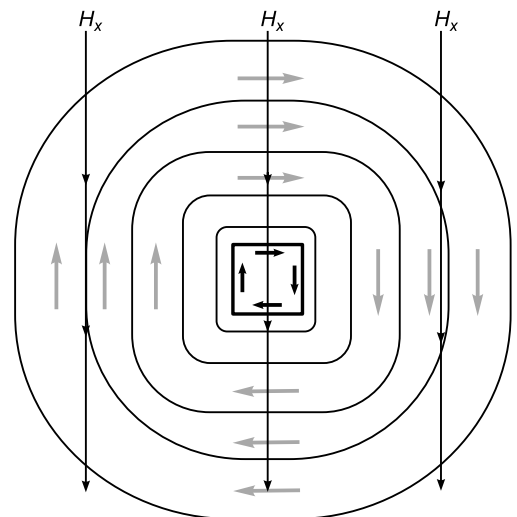


Рис. 9. Моделирование влияния геометрических искажений установки:

a — сигналы в линии *MN* от искаженной установки, *б* — типы искажения геометрии установки: 1 — параллельный сдвиг на 1 м, 2 — сдвиг концов на 0,5 м в разные стороны, 3 — сдвиг концов на 1 м в разные стороны, 4 — сдвиг ближнего конца на 1 м.

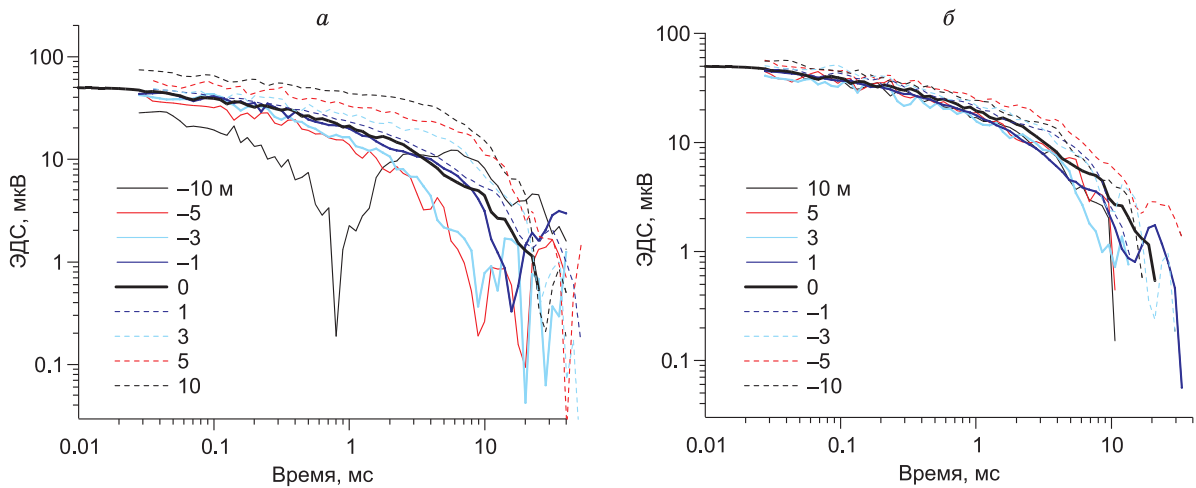


Рис. 10. Кривые абсолютных значений экспериментальных сигналов от геометрически искаженных линий до (а) и после коррекции (б) (линия MN1 на первом участке): в легенде указана величина сдвига ближнего конца линии MN от центрального положения в метрах.

нал и начинается смена знака сигнала, далее мы получаем уже отрицательный сигнал. Эта ситуация повторяется на всех восьми линиях MN, реализованных в 2019 г. на двух точках.

Поскольку мы измеряли также вблизи внутренних концов приемных линий компоненту E_{ϕ} короткой 100-метровой линией, перпендикулярной основной, то можно скорректировать искаженные смещением электрода измерения, вычтя соответствующий смещению сигнал. Действительно, как показано на рис. 10, б, после коррекции остается общая основа — наш искомый сигнал. На наш взгляд, это поддерживает достоверность и замкнутость наших измерений.

Другая важная проблема достоверности наших аномальных сигналов состоит в возможности генерации сигналов из-за горизонтальной неоднородности среды. Выше мы уже показали пример нашего трехмерного моделирования (см. рис. 5). Моделирование подтверждает ту точку зрения, что любая неоднородность создаст в четырех разнонаправленных линиях совершенно различные сигналы, а наши сигналы вполне повторяются в каждой линии, как им и следует (с уже сказанными оговорками).

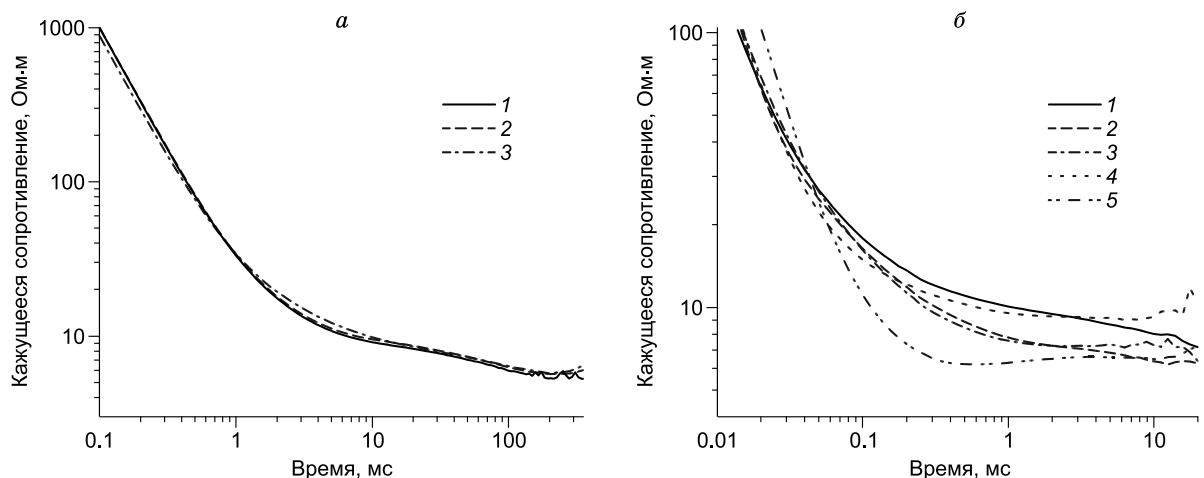


Рис. 11. Кривые кажущегося сопротивления «больших» центральных соосных зондирований (а):

1 — первый участок в 2018 г., 2 — первый участок в 2019 г., 3 — второй участок в 2019 г.

Кривые кажущегося сопротивления малоглубинных соосных зондирований на дальних концах радиальных линий MN и в центре на втором участке в 2019 г. (б):

1 — центральная петля, 2 — дальний конец линии MN1, 3 — дальний конец линии MN2, 4 — дальний конец линии MN3, 5 — дальний конец линии MN4.

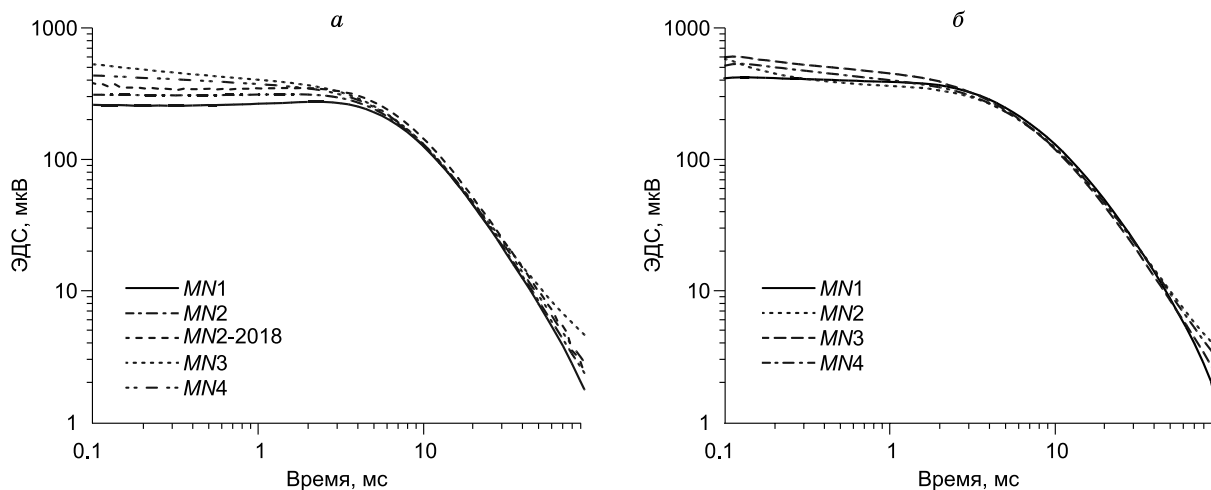


Рис. 12. Кривые сигналов становления компоненты поля E_ϕ , измеренные на ближних концах радиальных линий MN на первом участке в 2018 и 2019 гг. (а) и втором участке (б).

Более того, в дополнительных измерениях 2019 г., которые производились в точках заземлений приемных линий — измерения E_ϕ на ближних концах и соосные малоглубинные ЗСБ на дальних — подтвердилось, что больших, глобально влияющих неоднородностей фактически нет. Есть только локальные приповерхностные неоднородности.

На рисунке 11, а показаны кривые кажущегося сопротивления для больших генераторных петель. Из рисунка видно, что разрезы на двух удаленных на несколько километров друг от друга точках очень близки. Если посмотреть кривые кажущегося сопротивления для малых генераторных петель (100×100 м), измеренных в центре и на дальних концах линий MN , то видно (см. рис. 11, б), что они отличаются, но только в верхней части разреза, на первых 200 м.

Компонента E_ϕ очень чувствительна к параметрам разреза, и различия в сигналах для всех линий с обоих участков различаются только для начальных времен (рис. 12). Можно сделать следующие выводы: изменения в разрезе для первого и второго участков существуют, но они относятся только к ВЧР и для глубин более 200 м совпадают, что говорит о совпадении разреза. Это еще одно доказательство того, что место проведения исследований близко к одномерному разрезу. Различия в поведении сигналов на поздних временах для компоненты E_ϕ связано с импульсными, ветровыми помехами, которые неизбежно присутствуют при измерениях заземленными линиями.

В целом интерпретация и анализ кривых показывают, что на глубине около 300 м суммарная продольная проводимость у всех кривых составляет около 30 См, это значит, что для больших петель все эти различия в разрезе в верхней части интегрируются и воспринимаются как эквивалентный разрез. Учитывая, что наша установка с приемными линиями охватывает площадь 3500×3500 м, а зона зондирования еще шире, эти неоднородности ВЧР не сказываются в результатах. При учете априорной информации по ВЭЗ, сейсморазведке и бурению в районе наших исследований было определено, что есть изменения в разрезе на первых 300 м, а дальше разрез очень выдержан и латерально однороден, что дополнительно показали и наши исследования ЗСБ малыми петлями.

Было также проведено трехмерное математическое моделирование для оценки влияния на сигналы в линиях MN различий в ВЧР, которое показало, что сигналы от таких изменений не превышают 1 мкВ на всем промежутке измеряемых времен, т. е. неоднородности в ВЧР не могут быть источником регистрируемых нами сигналов в линиях MN .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХОЛЛОВСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

На текущей стадии исследований нашей задачей является установление факта проявления геомагнитного эффекта. Конечно, экспериментальный результат должен подкрепляться теорией. Вообще, электродинамика в скрещенных электрических и магнитных полях достаточно разработана в рамках развития теории эффекта Холла или, например, магнитогидродинамики [Гинзбург, 1967; Ландау, Лифшиц, 1982; Кучис, 1990]. Проблема, однако, в том, что эффекты зависят от процессов на микроуровне среды. Для геологической, весьма разнообразной среды довольно безнадежно все это учесть. Выход

состоит во введении эффективных параметров или параметра, который определяется эмпирически. Аналогично, собственно, удельному электрическому сопротивлению.

Итак, процесс становления от горизонтальной токовой петли в горизонтально-слоистой среде об­ладает, естественно, осевой симметрией. Решение хорошо известно, и является чистой ТЕ-модой с компонентами H_r, H_z и единственной электрической — E_ϕ .

Однако внешнее (учтем только вертикальное H_z^0) магнитное поле посредством силы Лоренца вызывает радиальные токи

$$j_r = v \cdot H_z^0 \cdot E_\phi = \sigma_H \cdot E_\phi, \quad (1)$$

где σ_H — холловская проводимость. Замыкаясь в вертикальных плоскостях, эти токи ответственны за возбуждение ТМ-моды и компоненты H_ϕ магнитного поля. Таким образом, теперь общее решение содержит обе моды, которые «подпитывают» друг друга, и, строго говоря, разделения мод не происходит. Но понятно, что холловская проводимость σ_H мала, также слаба и возбуждаемая ТМ-мода. Мы можем рассматривать по отдельности основной ТЕ-процесс становления и ТМ-процесс, у которого источником является «сторонний» ток (1), в котором полное поле E_ϕ заменяем на нормальное E_ϕ^{TE} .

Для возникающей ТМ-моды имеем задачу, в которой первое уравнение Максвелла можно записать в виде

$$\text{rot } \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}_{\text{ст}}, \quad (2)$$

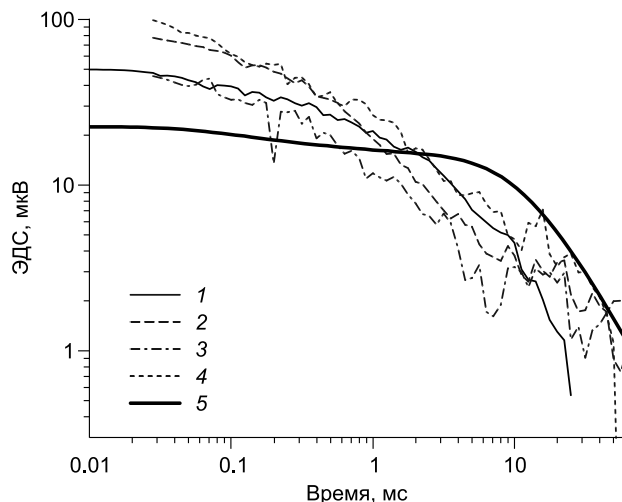
где $\mathbf{H} = \{0, H_\phi, 0\}$, $\mathbf{E} = \{E_r, 0, E_z\}$, $\mathbf{j}_{\text{ст}} = \{\sigma_H E_\phi^{TE}(r, z), 0, 0\}$. Эту задачу можно решать, например, для слоистой среды, зная σ_H в каждом слое (но откуда?!). В первом, самом грубом приближении, не учитывая установление самой ТМ-моды, радиальный электрический градиент ТМ-поля будет определяться как

$$E_r^{\text{TM}} \approx \frac{\sigma_H}{\sigma} \cdot E_\phi^{\text{TE}}, \quad (3)$$

и нам этого достаточно, чтобы предложить способ оценки возникающей ТМ-моды. Итак, в первом приближении имеет место следующее выражение для разности потенциалов между точками r_1 и r_2 :

$$\Delta U = \frac{\sigma_H}{\sigma} \cdot \int_{r_2}^{r_1} E_\phi^{\text{TE}} dr, \quad (4)$$

где σ — обычная проводимость среды, а функция E_ϕ есть хорошо известное решение для горизонтально-слоистой среды без учета геомагнитного фактора. Интеграл также легко вычисляется. Теперь, сравнивая полевые измерения и теоретический расчет для определенной нами выше горизонтально-слоистой среды (см. таблицу), мы можем получить оценку холловской проводимости. В качестве σ , учитывая весьма приближенный характер формулы (4), возьмем усредненное значение проводимости по разрезу (около 10 Ом·м). На рисунке 13 в группе полевых кривых показана также теоретическая кривая, рассчитанная по формуле (4) при $\sigma_H = 0.002$ См/м.



Таким образом, мы определили холловскую проводимость. Значение $\sigma_H = 0.002$ См/м устраивает нас еще и потому, что согласуется с результатами работы [Плоткин и др., 2019], в которой холловская проводимость определяется по магнитотеллурическим данным. Все же теоретическая кривая имеет несколько другой характер спада. Возможно, сказывается наше пренебрежение в формуле (3) вторичными «холловскими» токами.

Рис. 13. Полевые (1—4) и теоретический (5) сигналы становления в радиальных линиях MN на первом участке.

ВЫВОДЫ

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 $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ См/м. Достоверность полученных результатов подтверждена повторными измерениями, дополнительными экспериментальными исследованиями, анализом полученного материала на соответствие теории и математическим моделированием.

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

ЛИТЕРАТУРА

Иванов М.И., Катешов В.А., Кремер И.А., Эпов М.И. Программное обеспечение Модем 3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации // Записки Горного института, 2009, т. 183, с. 242—245.

Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М., Наука, 1967, 684 с.

Кучис Е.В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. М., Радио и связь, 1990, 264 с.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М., Наука, 1982, 621 с.

Могилатов В.С. О влиянии геомагнитного поля на процесс установления токов в земле // Геофизика, 2013, № 4, с. 70—75.

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.

Magnetic field calculator [электронный ресурс] // URL: <https://geomag.nrcan.gc.ca/calc/mfcal-en.php> (дата обращения 30.01.2020).

*Поступила в редакцию 20 февраля 2020 г.,
принята в печать 17 мая 2020 г.*