

Экспериментальное изучение влияния магнитного поля Земли на процесс установления электрического тока в геологической среде

В.С. Могилатов* (ИНГГ СО РАН, НГУ), В.В. Потапов (ИНГГ СО РАН), А.Н. Шеин, (ИНГГ СО РАН), В.А. Гурьев (НГУ)

Введение

В принципе, существует взаимодействие между токами, возникающими в геоэлектроманнитных полях и магнитным полем Земли и это базируется на эффекте Лоренца [Кучис, 1990], [Ландау и Лифшиц, 1982]. Проблема состоит только в установлении реального проявления этого фактора в геоэлектроманнитных зондированиях. Самый 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. По нашему мнению, наиболее подходящей экспериментальной схемой являются зондирования становлением электромагнитного поля, как наиболее чувствительный метод [Могилатов, 2013]. При поддержке Российского фонда фундаментальных исследований мы, наконец, смогли летом 2018 года провести специальные полевые эксперименты в Новосибирской области, а в 2019 повторили их, подтвердили и дополнили.

Теоретические предпосылки

Учесть влияние магнитного поля можно, приняв во внимание силу Лоренца и вводя специфический фактор, что отражается в первом уравнении Максвелла в виде

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

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 характеристиками среды на микроуровне. 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. Примем, что магнитное поле Земли вертикально (рис. 1а). Тогда из уравнения (1), раскрывая векторное произведение, получим, что появляется радиальная электрическая компонента

$$E_r = \nu H^0 E_\varphi \equiv \frac{\sigma_H}{\sigma} E_\varphi. \quad (2)$$

Измеряя радиальной линией разность потенциалов

$$\Delta U = \nu H^0 \cdot \int_{r_1}^{r_2} E_\varphi(r) dr, \quad (3)$$

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 ЗС.

Таким образом, предлагается простая экспериментальная схема (рис. 1б). 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.

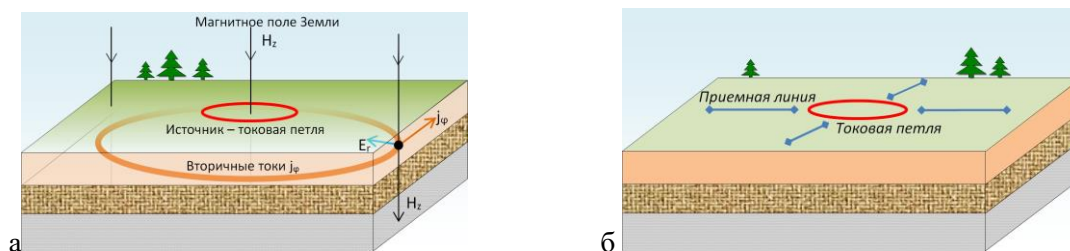


Рисунок 1. Появление холловской напряженности электрического поля (а) и экспериментальная установка (б).

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).

После рекогносцировочных выездов было выбрано место в Татарском районе Новосибирской области недалеко от поселка 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, все необходимые условия для успешного решения поставленных задач могут быть выполнены.

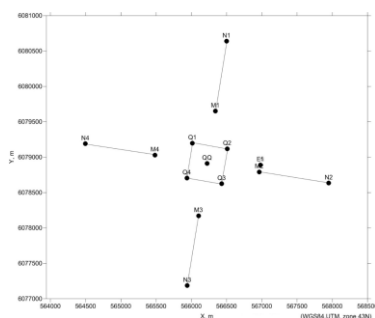


Рисунок 2. Схема установки.

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.

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 – от аккумуляторов (11,5-12,5 Ампер).

Таблица 1. 1D геоэлектрический разрез по данным ЗСБ.

N	УЭС (Омм)	Мощность (м)
1	10	24
2	7	357
3	4	791
4	15	Inf.

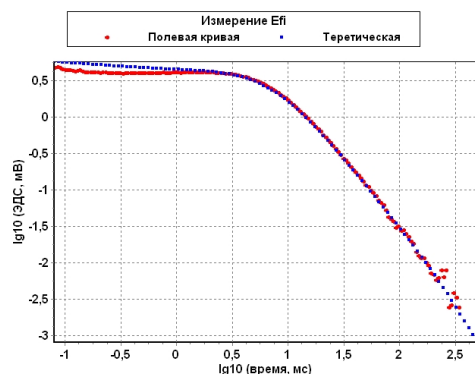


Рисунок 3. Сравнение полевого сигнала (E_ϕ) и рассчитанного.

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 (750м). На ранних временах, может быть, нужно уточнить одномерную структуру верхней части разреза.

Основные измерения

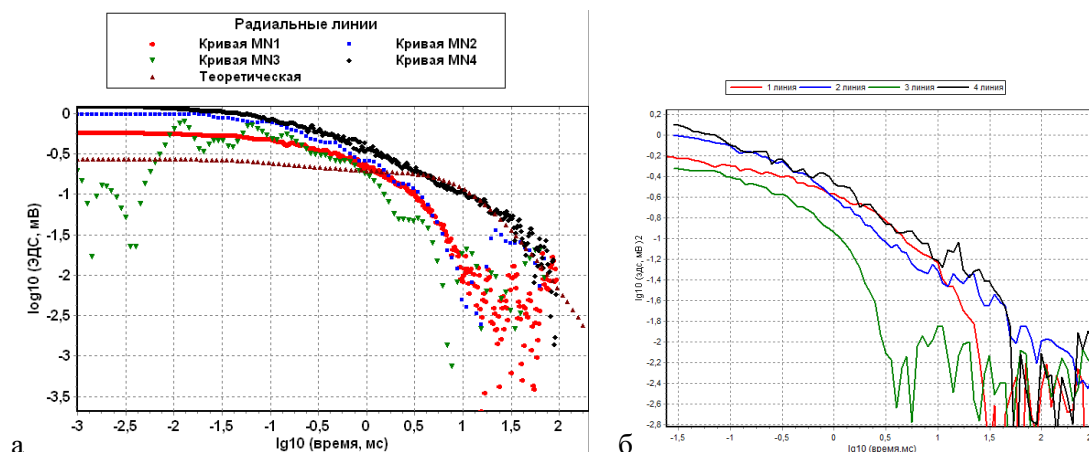


Рисунок 4. Измерения 2018 года (а) и измерения 2019 года (б). Сравнение полевых сигналов с теоретическим для $\sigma_h=0.002$ См/м (а).

На рис. 4 приведены устанавливающиеся сигналы со всех четырех линий в 2018 и 2019 годах. К сожалению, в течение работ 2018 года резко ухудшалась погода (шторм, гроза, ливни), а

Вспомогательные исследования и среда. Прежде всего, с помощью подготовленной для основного эксперимента генераторной петли (500x500м) и приемной петли (100x100м), были произведены соосные зондирования ЗСБ. Были произведены регистрации процесса 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 табл. 1.

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 . Применим следующую процедуру контроля. Для среды, полученной как результат интерпретации соосных ЗСБ (см. табл. 1), мы можем рассчитать сигнал для короткой приемной электрической линии, перпендикулярной основной линии MN2 (схема на рис. 2). Теперь сравним расчет с измеренным на практике сигналом (рис. 3).

наши временные и финансовые ресурсы были ограничены. Так что качество измерений далеко не однородно. Учитывая важность полученных в 2018 году результатов, а также малый объем измерений и невысокое качество, мы повторили наши измерения в 2019 году. Но по результатам полевых работ 2019 года мы можем уверенно констатировать повторяемость и достоверность.

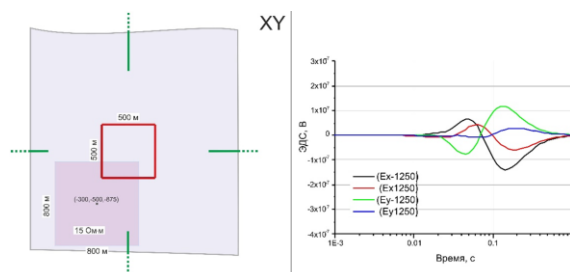


Рисунок 5. Кривые становления сигналов в 4-ех линиях в присутствии локальной неоднородности.

Сравним полевые сигналы с теоретическим сигналом вследствие эффекта Холла, рассчитанным по формуле (3). На рис. 4а приведено такое сравнение. 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. Главным аргументом является то, что сигналы в четырех разнонаправленных линиях примерно одинаковы. Все другие факторы дают совершенно разные сигналы. Например, (по результатам трехмерного моделирования) неоднородность в разрезе индуцирует разные, разнополярные сигналы становления в 4-ех линиях (рис. 5). Конечно, сигналы все же различаются, но это устойчивое различие мы связываем с наличием горизонтальной компоненты магнитного поля Земли.

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. Экспериментальные результаты подтверждены повторными измерениями.

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

Список литературы

Кучис Е.В. [1990] Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. Радио и связь, Москва.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. [1982] Электродинамика сплошных сред. Наука, Москва.

Могилатов В.С. [2013] О влиянии геомагнитного поля на процесс установления токов в земле, Геофизика, 4, 70-75.

References

Kuchis E.V. [1990] Galvanomagnitnye efekty i metody ix issledovaniya. Radio i svyaz, Moskva.

Landau L.D., Lifshic E.M. [1982] Elektrodinamika sploshnyx sred. Nauka, Moskva.

Mogilatov V.S. [2013] O vliyaniy geomagnitnogo polya na process ustanovleniya tokov v zemle, Geofizika, 4, 70-75.