EAGE Geomodel-2017

Submission ID: 43765

Accounting for the Hall Conductivity in the Electromagnetic Sounding of the Earth

V.S. Mogilatov* (Trofimuk Inst. of Petroleum Geology & Geophysics), V. Plotkin (Trofimuk Inst. of Petroleum Geology & Geophysics)

SUMMARY

Due to the presence of strong geomagnetic field, electric currents within the Earth are affected by the appearance of the Lorentz force producing additional extrinsic currents, which contribute to the total measured electromagnetic field. This effect, well known in physics as the Hall effect, is totally ignored in conventional geoelectric and geoelectromagnetic exploration. However, even very general and preliminary analysis shows that this effect is markedly present in geoelectromagnetic signals and, if not being counted, might lead to difficulties or to significant errors in the interpretation. In particular, the Hall effect causes the appearance of the effective anisotropy and magnetization of rocks, which are originally isotropic and nonmagnetic.

Учет холловской проводимости в электромагнитных зондированиях Земли

В.С. Могилатов* (Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Новосибирский государственный университет), В.В. Плоткин (Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН)

Введение

Глубинные электромагнитные зондирования Земли с естественными и искусственными источниками производятся посредством изучения распространения токов в проводящей геологической среде. При этом прямое моделирование и процесс интерпретации данных не учитывают присутствие такого тотального фактора как геомагнитное поле. Не странно ли это? Магнитное поле Земли весьма реально присутствует даже на бытовом уровне. Нетрудно показать, что напряженность поля Земли на несколько порядков больше магнитных полей, индуцируемых в геоэлектромагнитных полях, которые используются для зондирований. Кроме того, хорошо известен и механизм воздействия магнитного поля на токи в проводящей среде – сила Лоренца. Наконец, это воздействие может быть заметным из-за больших объемов среды и полей, участвующих во взаимодействии при глубинных электромагнитных зондированиях. В физике рассматривается много проявлений эффекта и силы Лоренца в скрещенных электрическом и магнитном полях [Кучис, 1990]. Довольно очевидным является вопрос об эффекте Холла в геологической среде при протекании в ней тока под действием электрического поля («собственного») и в присутствии магнитного поля («внешнего»). Таким образом, наша цель – обратить внимание геоэлектриков на эту проблему, а также наметить конкретные возможности для обнаружения и оценки влияния магнитного поля Земли при геоэлектрических исследованиях методами МТЗ и зондирований становлением (ЗС).

Эффект Холла в магнитотеллурических зондированиях

Возможное влияние магнитного поля Земли на результаты МТЗ можно оценить, если учесть холловскую проводимость среды [Ландау, Лифшиц, 1982]. В геомагнитном поле электропроводность среды (в том числе и геологической) становится тензором. Безусловно, степень анизотропии электропроводности определяется не только величиной магнитного поля, но и такими характеристиками микропроцессов в среде, как подвижность носителей тока, соударения частиц и т.п. К сожалению, для геологической среды характеристики микропроцессов в ней пока известны явно недостаточно. Это затрудняет теоретические оценки величины холловской проводимости. Поскольку в ряде случаев при электромагнитных зондированиях возникали предположения [Могилатов, 2013] о возможной замагниченности среды, становится актуальным эксперимент, который позволил бы оценить реальную величину холловской проводимости геологической среды. Рассмотрим возможный вариант такого эксперимента в приложении к МТЗ.

Если исходить из общих представлений, в системе координат с магнитным полем, направленным вдоль оси OZ, тензор электропроводности среды $\hat{\sigma}$ имеет вид:

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma & -\sigma_H & 0 \\ \sigma_H & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \end{pmatrix}, \qquad (1)$$

где σ_H – холловская проводимость, а σ – обычная электропроводность среды. Чтобы быть ближе к реальной ситуации, рассмотрим далее эффект в системе координат с началом в пункте зондирования и осями в плоскости магнитного меридиана: осью *OX* – направленной на северный магнитный полюс и осью OZ – вниз. Ось *OY* направим перпендикулярно плоскости меридиана (рис. 1).

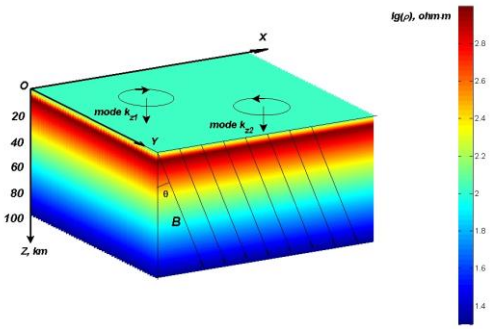

Рисунок 1 *Влияние эффекта Холла при магнитотеллурическом зондировании*

В случае холловской проводимости (1) появятся две анизотропные моды, которые имеют круговую поляризацию, но в одной моде электрическое поле вращается по часовой стрелке, во второй – против (рис. 1).

При наличии холловской проводимости среды импеданс на поверхности Земли должен зависеть от поляризации поля. Для разных направлений вращения вектора электрического поля – против или по часовой стрелки – ожидаются и различные значения импедансов. Измеряя отношения этих импедансов, можно оценить величину холловской проводимости.

Существенно, что модовые импедансы нужно вычислять отдельно по каждой из анизотропных составляющих через их амплитуды [Плоткин, 2017]. Полный тензор импеданса обычно определяют, используя два независимых состояния поляризации полей. При таком подходе получится:

$$Z_{xy} = -i\omega\mu \frac{k_{1z} + k_{2z}}{2k_{1z}k_{2z}} = -Z_{yx}, \quad Z_{xx} = -i\omega\mu \frac{k_{1z} - k_{2z}}{2k_{1z}k_{2z}} = -Z_{yy} \qquad (2)$$

Но такой тензор характерен и в случае латеральной неоднородности среды. Чтобы отличить эти эффекты, необходимо полное определение тензора электропроводности с помощью МТЗ, которое возможно с привлечением синхронной площадной съемки данных по латеральной неоднородности компонент электромагнитного поля [Плоткин, 2012].

Эффект Лоренца и Холла в зондированиях становлением

Самые простые физические соображения позволяют легко заметить проблему влияния магнитного поля Земли на процесс установления. Рассмотрим возбуждение Земли токовой петлей. Пока ток не выключен, это похоже на закрепленную магнитную стрелку. После выключения, вторичные токи также взаимодействуют с полем Земли и, будучи свободными, подвергаются деформации (рис.2).

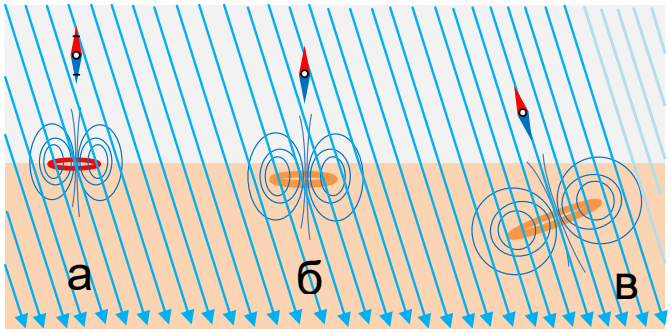

Рисунок 2 *Магнитные поля первичных(а) и вторичных токов (б) в ЗС обладают магнитным моментом и взаимодействуют (в) с магнитным полем Земли подобно магнитной стрелке*

Для описания этого явления мы применим другой подход, нежели выше в случае МТЗ. Учитывая наличие силы Лоренца, можно формально представить первое уравнение Максвелла в виде

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \sigma\cdot\mathbf{E} + \nu\cdot\left[\mathbf{j},\mathbf{H}^0\right], \tag{3}$$

где ν – коэффициент, удовлетворяющий размерности и учитывающий способность среды к появлению холловского тока, $\mathbf{H}^0$ – поле Земли. Или

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \sigma\cdot\mathbf{E} + \sigma\nu H^0\cdot\left[\mathbf{E},\mathbf{e}^0\right], \tag{4}$$

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

Теперь мы видим, что дополнительная проводимость 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).

Экспериментальное изучение холловской проводимости в ЗС

Обоснуем эксперимент для фиксации и оценки геомагнитного эффекта. Рассмотрим самую простую осесимметричную ситуацию – токовую петлю в качестве источника и вертикальное магнитное поле Земли. Нормальное (без влияния внешнего поля) электрическое поле петли имеет только компоненту E_φ . В первом приближении в магнитном поле Земли появится радиальный ток $j_r = \sigma\nu H^0 E_\varphi$, согласно (4), что эквивалентно появлению радиальной компоненты электрического поля в «нормальной» изотропной среде $E_r = \nu H^0 E_\varphi$ (рис. 3).

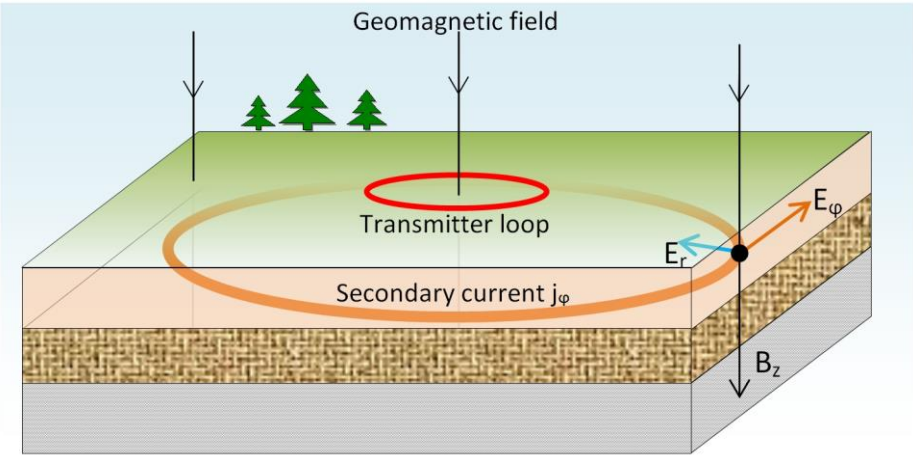

Рисунок 3 *Появление холловской напряженности электрического поля*

Таким образом, измеряя радиальной линией разность потенциалов $\Delta U = \nu H^0\cdot\int_{r_1}^{r_2} E_\varphi(r)dr$, где для известной горизонтально-слоистой среды функция E_φ, как и интеграл от нее, нам хорошо известна, мы можем определить коэффициент ν, который и определяет геомагнитный эффект в любом методе ЗС.

На рис. 4 показана возможная схема наблюдения. Предлагается четыре положения радиальной измерительной линии для повышения достоверности результата. Кроме того, нужно также перемещать всю установку и исключить влияние неоднородностей в разрезе.

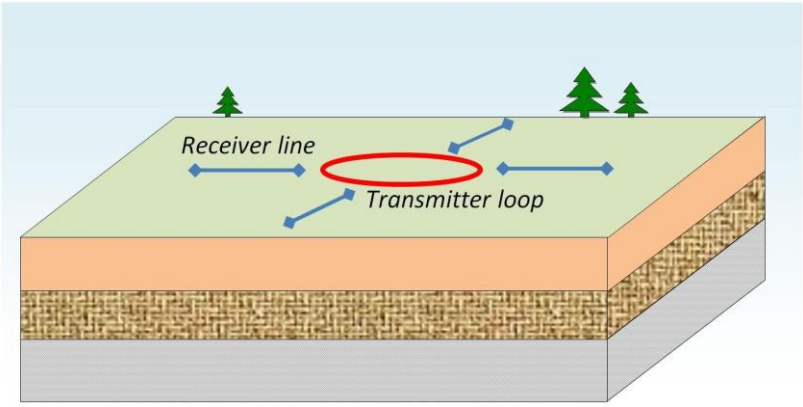

Рисунок 4 *Схема определения холловской анизотропии в ЗС*

Выводы

● За неимением строгой теории с учетом микропроцессов в геологической среде, в настоящее время наиболее эффективными способами изучения геомагнитного эффекта в электромагнитных зондированиях являются эмпирические исследования и применение некоторых упрощенных теоретических приближений для проведения полуколичественных оценок эффективных параметров Холла, таких как анизотропия и проводимость.
● Эмпирическое исследование может быть выполнено либо в рамках специально разработанного научного эксперимента, либо во время обычных электроразведочных изысканий практически без дополнительных затрат, но с особым вниманием к точности.
● Непосредственная польза от измерения и подсчета эффекта Холла в обычных исследованиях – более точная и эффективная интерпретация собранных данных.
● Наиболее важным является рассмотрение холловской проводимости как нового геоэлектрического параметра, который связан с литологическими и геохимическими свойствами среды. В результате холловская проводимость может обеспечить дополнительную геологическую информацию, которую нельзя получить, игнорируя геомагнитный эффект

Благодарности

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

Библиография

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.

Плоткин В.В. [2012] Магнитотеллурическое зондирование плавно неоднородной анизотропной среды. Геология и геофизика, Т.53, № 8, 1078-1089.

Плоткин В.В. [2017] Методика определения вклада эффекта Холла при магнитотеллурическом зондировании. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология" (г. Новосибирск, 17-21 апреля 2017 г.): Сборник материалов - Новосибирск: СГУГиТ, 2017.

References

Kuchis E.V. [1990] Gal'vanomagnitnye ehffekty i metody ih issledovaniya. Radio i svyaz', Moskva

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

Mogilatov V. [2013] Influence geomagnetic field on the transient process of the secondary currents in Earth // Geofizika. N 4. Pp. 70–75.

Plotkin V.V. [2012] Magnitotellurichеskoe zondirovanie plavno neodnorodnoj anizotropnoj sredy. Geologiya i geofizika, T.53, № 8, 1078-1089.

Plotkin V.V. [2017] Metodika opredeleniya vklada ehffekta Holla pri magnitotellurichеskom zondirovanii. Interehkspo GEO-Sibir'-2017. XIII Mezhdunar. nauch. kongr.: Mezhdunar. nauch. konf. "Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Geoehkologiya" (g. Novosibirsk, 17-21 aprelya 2017 g.): Sbornik materialov - Novosibirsk: SGUGiT, 2017.