

О ВЛИЯНИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС УСТАНОВЛЕНИЯ ТОКОВ В ЗЕМЛЕ

Могилатов В.С.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск,

Рассмотрена проблема взаимодействия магнитного поля Земли и вторичных токов в геоэлектромагнитных зондированиях становлением. Показано, что это взаимодействие приводит к эффективным анизотропии проводимости и намагниченности горных пород. Результаты и выводы носят предварительный характер, а основная цель публикации состоит в привлечении внимания к этой проблеме и обсуждении.

Ключевые слова: зондирования становлением, магнитное поле Земли, эффект Лоренца

Установление вторичных токов в земле, возбуждаемых при зондированиях с контролируемыми источниками, происходит в магнитном поле Земли, которое (~ 50 А/м) в тысячи и десятки тысяч раз больше вторичных магнитных полей, возбуждаемых при зондированиях становлением. Насколько известно автору, влияние его на сам процесс становления не обсуждалось. Вот это довольно-таки странно. В физике есть область знаний, где изучается движение заряженных частиц, составляющих ток, в скрещенных электрическом и магнитном (внешнем) полях. Речь идет о гальваномагнитных эффектах (например, известный эффект Холла [1]).

Мы можем заметить проблему с совсем простой точки зрения. Все знают, что поле Земли поворачивает магнитную стрелку, которая является магнитным диполем. В больших масштабах первичное магнитное поле токовой петли, а также и поле вторичных токов установления можно считать полями диполей. Пока ток в петле не выключен, это можно сравнить с закрепленной магнитной стрелкой (рис.1a). Но когда ток выключен, возникает «плавающий» в проводящей геологической среде диполь. И он должен повернуться так же, как поворачивается магнитная стрелка (рис.1b). Конечно, весь вопрос в том, как быстро происходит дрейф и перестройка вихревых токов. По-видимому, искажения классического процесса установления не успевают развиваться значительно. В противном случае это было бы замечено давно. Кстати, общепринятая технология зондирований становлением предусматривает многократное накопление сигнала от разнополярных импульсов, и это может значительно нивелировать рассматриваемый эффект. Но не всегда и не полностью. Ниже мы будем предполагать, что геомагнитный эффект уже проявлял себя в полевых наблюдениях, но только эти проявления не интерпретировались соответствующим образом. Времена меняются, применяются все более сложные подходы к интерпретации (трехмерные) и необходимо учитывать все эффекты, влияющие на сигнал.

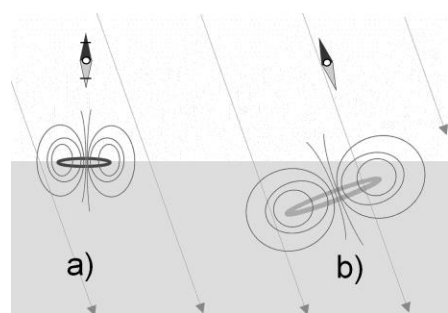


Рис.1. Закрепленный и незакрепленный магнитные диполи в магнитном поле Земли

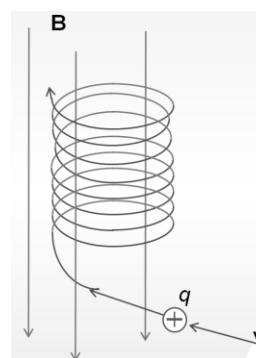


Рис.2. Движение заряда в магнитном поле

Следует еще заметить, что показанная возможность искажения общей картины распределения вторичных токов – это не единственное проявление магнитного поля Земли в процессе становления. Дрейф вторичных токов происходит в результате сложного движения отдельных носителей тока (заряженных частиц) под влиянием силы Лоренца и столкновений с другими частицами и с неподвижным скелетом. Круговые движения во внешнем магнитном поле (эффект Лоренца) не завершаются (как на рис.2), но тенденция есть, и возникает дополнительный магнитный момент в

направлении магнитного поля Земли. Этот эффект (назовем его геомагнитным эффектом второго рода) слаб и, скорее всего, не заметен в традиционных методах ЗС. Но мы ниже рассмотрим специальную методику, где, возможно, этот эффект играет ключевую роль.

Рассмотрим и напомним некоторые теоретические сведения, имеющие отношение к геомагнитному эффекту в ЗС. Сначала отметим, что геомагнитное поле действительно велико в электродинамических масштабах зондирования становлением. В случае петли среднее значение магнитного поля 0.01 А/м, в случае КЭД – среднее значение всего лишь 0.0004 А/м. Действительно, магнитное поле Земли – мощный фактор, который только и ждет малейшего повода вмешаться в нашу «контролируемую» геоэлектродинамику. А повод на самом деле есть. В физике известно взаимодействие тока и магнитного поля. Движущийся заряд – это ток, обладающий некоторым магнитным полем. Можно сказать, что в основе влияния внешнего магнитного тока на токи в сплошной среде лежит эффект Лоренца и сила Лоренца, действующая на движущуюся частицу-заряд в магнитном поле:

$$\mathbf{F} = q \cdot [\mathbf{v} \times \mathbf{B}], \quad (1)$$

где $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ – магнитная индукция. Под воздействием этой силы заряд приобретает кроме поступательного – вращательное движение в плоскости, перпендикулярной магнитному полю (рис.4). Радиус и угловая частота вращения:

$$r = \frac{m}{|q|} \cdot \frac{v \cdot \sin \alpha}{B}, \quad \omega = \frac{|q|B}{m}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что все-таки есть воздействие на распределение вторичного тока со стороны магнитного поля Земли. Вторая сторона этого явления – возможность движения частицы в реальной среде. Понятно, что этот эффект чрезвычайно зависит от реального вещественного состава, микроструктуры среды, типа носителей заряда. Тем не менее, в принципе, возникает дополнительный магнитный момент вдоль внешнего магнитного поля. Круговое движение или движение по циклоиде не завершается из-за столкновений, частицы сложным образом дрейфуют под воздействием «своей» ЭДС и внешнего магнитного поля. Пусть электропроводность среды σ , плотность электрического тока \mathbf{j} , и в соответствии с законом Ома

$$\mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{E}. \quad (3)$$

При движении носителей в скрещенных электрическом и магнитном полях на носители заряда действует сила

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E} + q \cdot [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]. \quad (4)$$

Под действием этой силы носители дрейфуют в направлении, перпендикулярном электрическому и магнитному полям. В реальных средах, когда свободный пробег (расстояние, которое носитель проходит между двумя последовательными соударениями) носителей ограничен, в слабом магнитном поле соударения не дают возможности завершить движение по циклоиде. Уравнение движения носителей в этом случае имеет вид:

$$\frac{\partial(m \cdot \mathbf{v})}{\partial t} = -\frac{m \cdot \mathbf{v}}{\bar{\tau}} + q \cdot \mathbf{E} + q \cdot [\mathbf{v} \times \mathbf{B}], \quad (5)$$

где m – эффективная масса носителей заряда, $\bar{\tau}$ – среднее время свободного пробега. Решая уравнение движения, можно получить соотношение между скоростями по разным направлениям. Эту теорию можно развивать, и она развита для «хороших» сред (например, кристаллы). Но геологическая среда очень сложна. Параметр $\bar{\tau}$ – среднее время свободного пробега – весьма проблематичен для нашей пористой, многофазной, неоднородной на микро- и на макро-уровне среды. Тем не менее, мы можем сейчас сказать, что при наличии магнитного поля в тензоре электропроводности появляются недиагональные компоненты, обусловленные несопадением направлений электрического поля и тока. В этом случае связь тока с электрическим полем описывается тензорным уравнением:

$$j_i = \sum_{k=1}^3 \sigma_{ik}(\mathbf{B}) \cdot E_k. \quad (6)$$

Таким образом, удельное сопротивление теперь имеет сложную структуру и значения, зависящие от величины и направления внешнего (земного) магнитного поля. Этот неглубокий теоретический анализ все же приводит к определенным выводам. Во-первых, геомагнитный эффект приводит к некоторым эффективным анизотропии и намагнитченности первоначально изотропной, немагнитной среды (геомагнитные эффекты первого и второго рода). Во-вторых, мы видим, что геомагнитный эффект очень тесно связан с вещественным составом среды и ее микроструктурой. В-

третьих, похоже, теория не скоро даст нам надежные количественные оценки, и в любом случае должна будет опереться на экспериментальные факты. Поэтому, оценку и изучение геомагнитного эффекта в ЗС можно скорее осуществить в экспериментах

Посмотрим, что мы уже имеем пока без целенаправленных полевых экспериментов. Рассмотрим три проблемы (по оценке автора) в электроразведке ЗС, которые можно было бы пытаться решить, гипотетически привлекая геомагнитные эффекты первого и второго рода.

1. Зависимость сигналов установки АВ- q от ориентации. Лично автор получал не один раз из разных источников сообщения и свидетельства о такой систематической (геологические неоднородности вроде бы исключались) зависимости. Наиболее подробно автор ознакомлен с работами ООО «ТНГ-Казаньгеофизика», к которым он привлекался для консультирования. В организации разработана и применяется методика ЗС с линией АВ в качестве источника и регистрацией горизонтальной компоненты индукции. Приемно-питающая установка АВ- $q_у$ удобна при профильных работах. Однако она обладает повышенной чувствительностью к анизотропии окружающей среды. Проблема выглядит весьма остро – в точках пересечения профилей значения суммарной продольной проводимости иногда различаются на 50-70%. Для точного выявления этого эффекта были организованы «крестовые» зондирования (4 ориентации установки на одной точке). Была замечена даже региональная тенденция. Предлагалось объяснение в виде сильной анизотропии горизонтальных сопротивлений в некоторых горизонтах, связанной с трещиноватостью. Недавно автор обратился в ООО «ТНГ-Казаньгеофизика» с просьбой сделать обзор работ на предмет корреляции сигналов с **географической** ориентацией. И такая связь намечается.

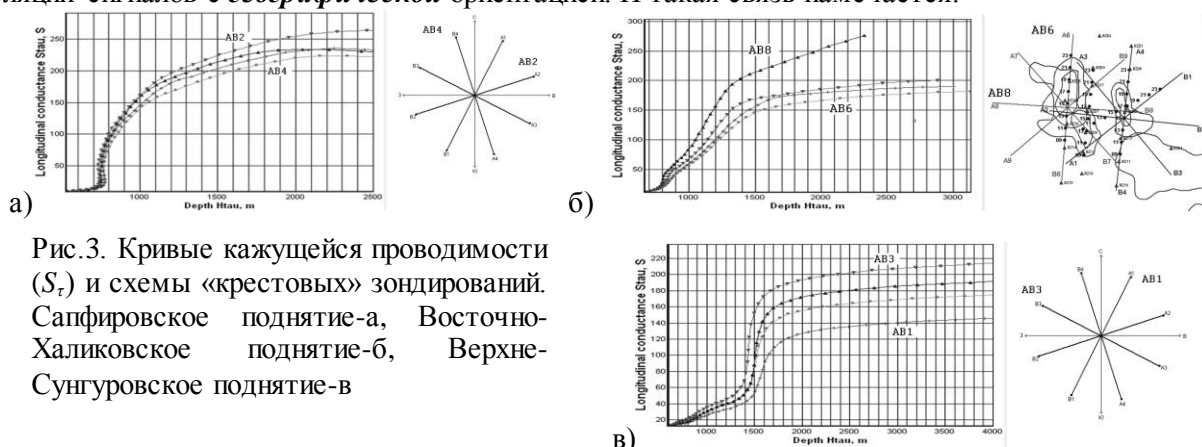


Рис.3. Кривые кажущейся проводимости (S_T) и схемы «крестовых» зондирований. Сафировское поднятие-а, Восточно-Халиковское поднятие-б, Верхне-Сунгуровское поднятие-в

Рис.3 демонстрирует, что установки, ориентированные в широтном направлении определяют существенно большие значения кажущейся продольной проводимости (S_T), чем ориентированные в направлении Юг-Север. Сложность тут в том, что в каждом отдельном случае зависимость от ориентации можно объяснить неоднородностью среды, наклонными границами или рельефом. Необходимо собирать статистику.

2. Многоразносные зондирования. В 70-80-ых годах происходило бурное развитие метода зондирований в ближней зоне (ЗСБ). Казалось, неизбежно будет создана конкурентоспособная (перед сейсморазведкой) электроразведочная технология с мощным фиксированным источником-петлей и обследованием отклика на обширной территории. Однако этого не случилось. На наш взгляд, проблемы начинались на стадии интерпретации «сильно-разнесенных» кривых. По личному опыту автора, они часто оказывались искажены не интерпретируемым образом и очень плохо соответствовали одномерной модели, полученной по надежным центральным (соосным) зондированиям. В результате проваливалась самая первая стадия интерпретации – снятие одномерного фона. Объяснения возможны многие, а мы теперь добавим еще одну тему – искажения из-за геомагнитного эффекта, которые нивелируются в соосных зондированиях, но растут с разномом. Возможно, научившись вводить «геомагнитную» поправку в данные разнесенных ЗС, мы повысим эффективность таких зондирований, особенно, при использовании трехмерного подхода к интерпретации.

3. Интерпретация данных ЗВТ в работах на нефть. Есть, возможно, проявления геомагнитного эффекта второго рода. Речь идет о данных зондирований вертикальными токами (ЗВТ). Метод основан на применении нового источника – кругового электрического диполя (КЭД) (рис.4). В теоретическом отношении КЭД является наземным аналогом вертикального электрического диполя (ВЭД) и возбудителем поля ТМ-поляризации. С практической точки зрения такая конфигурация питающего тока обеспечивает компенсацию магнитного отклика вмещающей

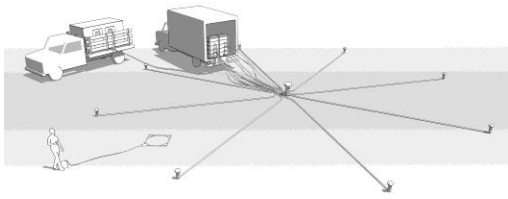


Рис.4. Схема работ методом ЗВТ

ряде работ (последние – в 2011) залежи нефти проявляют себя в площадном сигнале ЗВТ областью повышенных значений ЭДС одного знака (измерения dB_z/dt индуктивным датчиком) [2]. Контур отмечался сменой знака. Вот, например, на рис.5а представлен площадной рельеф сигнала на времени 200 мс на Шадкинском участке (Татарстан). Выделенная зона положительного сигнала ЗВТ согласуется с имеющимися скважинами и данными геохимических методов. Замечательно то, что эта площадная картинка мало меняется со временем до самых малых времен (рис.5г). Соответственно,

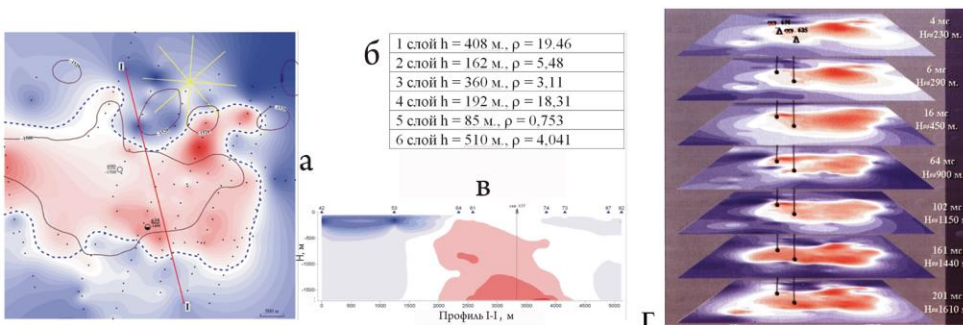


Рис.5. Карта изолиний сигнала ЗВТ на Шадкинском поднятии на времени 200 мс (а), вмещающий разрез (б), кажущийся разрез по сигналам ЗВТ (в) и карты изолиний на разных временах (глубинах)

кажущийся разрез вдоль обозначенного профиля (рис.5в) выявляет субвертикальный объект, «исходящий» из самой залежи (напомним, что в магнитном сигнале ЗВТ имеется информация только о неоднородности, а вмещающий геоэлектрический разрез, полученный по другим данным, показан в таблице на рис.5б). Такой результат (контур нефтеносности) вполне ценился заказчиками, но, конечно, нуждался в объяснении и дальнейшей интерпретации.

Собственно, анализ площадных сигналов показывает, что объем среды, занятой ореолом, в процессе становления приобретает магнитный момент, «намагничивается» в вертикальном (или близком к этому) направлении. Это выглядело странно, потому что КЭД возбуждает в земле только горизонтальное магнитное поле (H_θ), но, в конце концов, навело на мысль о земном поле, которое в наших широтах почти вертикально (наклонение 70°), и на геомагнитный эффект, который преобразует постоянное действие магнитного поля Земли в переходный магнитный момент ореола.

В заключение снова обращаем внимание на реальную физическую подоплеку геомагнитного эффекта, возможную его актуальность для традиционных методов. И, фактически, на сегодня он является безальтернативным объяснением природы сигналов зондирований вертикальными токами в зонах распространения углеводородов. Если актуальность геомагнитного эффекта будет доказана (это сообщение, конечно, недостаточно), то, во-первых, его можно рассматривать как помеху, которую надо учитывать. Но суть, по нашему мнению, в другом. Природа предоставляет нам дополнительные возможности для глубокого изучения геологической среды электромагнитными методами.

1. Кучис Е. В. Гальваномангнитные эффекты и методы их исследования. М.: Радио и связь. 1990. 264с.
2. Балашов Б.П., Мухамадиев Р.С., Могилатов В.С., Андреев Д.С., Злобинский А.В., Шишкин В.К., Стогний В.В. Оконтуривание залежей углеводородов зондированиями вертикальными токами // Геофизика. 2011. № 1. С.61-66.