

УДК 550.837

МАЛОИЗУЧЕННЫЕ ФЕНОМЕНЫ В ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ

В.С.МОГИЛАТОВ

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

Современные электроразведочные технологии, несомненно, возникают в результате развития традиционных подходов и методов. Однако более интересным является появление совершенно новых технологий на базе новых эффектов и новых моделей взаимодействия геологической среды и электромагнитного поля. Автор не берет на себя обязательство указать принципиально новые направления, а только хочет обсудить некоторые малоизвестные факты из теории и практики электроразведки. Результатом данной работы могло бы считаться привлечение внимания специалистов к нетрадиционным сигналам в электроразведке. В качестве интересных и, на взгляд автора, не вполне имплементированных феноменов рассмотрены разделение поля на две поляризации – поперечно-электрическую (ТЕ-поле) и поперечно-магнитную (ТМ-поле), некоторые малоизвестные свойства ТМ-поля, роль токов смещения, анизотропия горизонтальных сопротивлений, роль геомагнитного поля в электроразведочных зондированиях, уникальная разрешающая способность метода CSEM (Controlled Source Electro-Magnetic) в море.

Ключевые слова: электроразведка, переходные процессы, ТМ-поляризация, эффект Лоренца, токи смещения, анизотропия, CSEM.

Как цитировать эту статью: Могилатов В.С. Малоизученные феномены в электроразведке // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 783-788. DOI 10.18454/PMI.2016.6.783

Введение. Разумеется, современные электроразведочные технологии могут возникать в результате развития традиционных подходов и методов. Однако более интересным является появление совершенно новых технологий на базе новых эффектов и новых моделей взаимодействия геологической среды и электромагнитного поля. На примере вещей, в общем-то известных, но не широко, автор попытался показать возможность движения в разных направлениях.

Личный опыт автора говорит о том, что новых явлений следует ожидать, поменяв сам тип электромагнитного воздействия на геологическую среду. В силу одномерности базовой горизонтально-однородной модели среды в электроразведке с контролируемыми источниками имеет место разделение общего геоэлектромагнитного поля, т.е. каждой компоненты магнитного и электрического поля, на ТМ- и ТЕ-составляющие или поляризации (Transverse Magnetic и Transverse Electric). Используются также термины: ТМ- и ТЕ-поле, поперечно-магнитное и поперечно-электрическое поле, E - и H -моды, поле электрического типа и поле магнитного типа, гальваническое и индуктивное поле (например, [2]). На совершенно разные свойства этих составляющих поля произвольного источника обратил внимание еще Дж.Р.Уэйт в 1986 г. [11], оценивая чувствительность метода к выделению тонкого высокоомного горизонта. Это разделение позволяет эффективно и просто описать теорию, а также имеет глубокую связь с типами питающих установок. Такой известный источник, как токовая петля на дневной поверхности или в другой горизонтальной плоскости, возбуждает только ТЕ-поле. Известный источник, возбуждающий только ТМ-поле, – это малопрактичный вертикальный электрический диполь (ВЭД или линия – ВЭЛ). Также традиционный источник – горизонтальный электрический диполь (ГЭД или линия – ГЭЛ) – возбуждает смешанное поле, в котором, однако, превалирует ТЕ-мода.

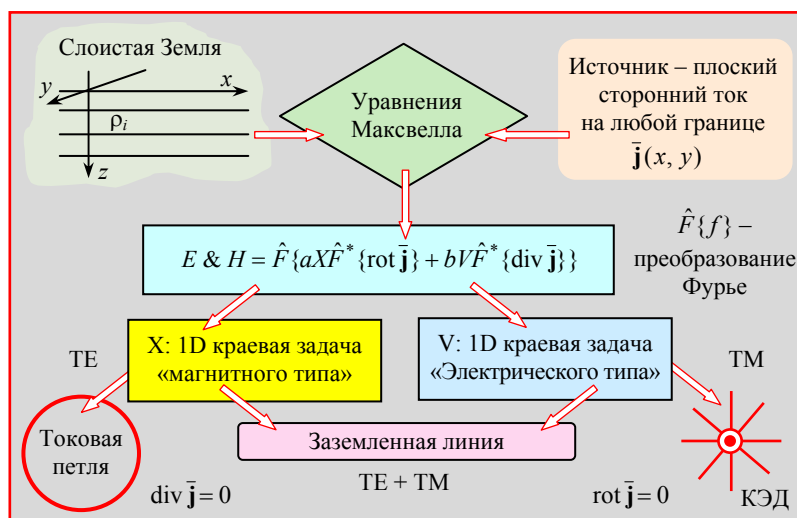


Рис.1. Условная физико-математическая модель электроразведки. Разделение на вклады ТЕ- и ТМ-поляризаций общего геоэлектромагнитного поля (E и H компоненты) от произвольного распределения стороннего тока в горизонтальной плоскости (плоский сторонний ток)

Физико-математическая модель индукционной электроразведки с контролируруемыми источниками, представленная условно на рис.1 (и подробно обоснованная в [2]), двуедина и симметрична по отношению к полям электрического и магнитного типов. Это совершенно не новая теория, а лишь схема, правильно отражающая дуальную (ТЕ-ТМ) природу геоэлектромагнитного поля. Она же прямо указывает на существование источника электромагнитного поля электрического типа, в некотором смысле симметричного хорошо знакомой токовой петле, – круговой электрический диполь (КЭД), представленный на рис.1 как абсолютно закономерное дополнение к основным электроразведочным источникам – токовым линии и петле. Но на практике эта схема не реализуется, слабо изучены свойства переменного ТМ-поля, не был известен наземный источник переменного поля электрического типа. Современная индукционная электроразведка (в частности, импульсная) основана практически лишь на использовании поля магнитного типа. Оно возбуждается индуктивно (например, петлей), и в целом речь идет об индуктивной электроразведке. Подход с позиций «ТЕ-ТМ-дуализма» к описанию теории, развитию технических средств и практики электроразведки с контролируруемыми источниками есть тема и метод, которые мы здесь используем.

Свойства ТМ-поля. Прежде всего, надо понимать, что ТМ-поле – это радикально иной способ существования электромагнитного поля в слоистой Земле и иной способ взаимодействия с нею, нежели привычное ТЕ-поле. На рис.2 условно представлены системы возбуждаемых токов при ТЕ-поляризации и ТМ-поляризации – знаменитое «токовое кольцо», образуемое горизонтальными токами, и тороидальная система токов, имеющая вертикальную электрическую компоненту. Первая возбуждается токовой петлей, вторая – вертикальным электрическим диполем, круговым электрическим диполем, точечным заземлением. Дело в том, что свойства ТМ-поля совсем иные, чем ТЕ-поля, общеизвестные и воспринимаемые как, собственно, свойства процесса установления. Установление ТМ-поля может происходить по экспоненте, поле не зависит только от суммарной продольной проводимости, всегда зависит от вертикальной структуры среды, на всех стадиях зависит от формы возбуждающего импульса тока, связано с анизотропией и очень тесно с параметрами вызванной поляризации (ВП), не имеет магнитного отклика на дневной поверхности. Последнее свойство очень важно, мы получаем возможность избавиться от мощного и генерализированного фона вмещающей толщи и можем регистрировать слабые сигналы, иногда новой природы [2].

Токи смещения. Тот факт, что традиционная индукционная электроразведка использует поле ТЕ-поляризации, способствует ограниченному взгляду на электроразведку в целом. Например, весьма распространено суждение, что в глубинной электроразведке токи смещения не играют роли [6]. Но это справедливо только по отношению к ТЕ- полю. А вот при использовании ТМ-поля ситуация совсем другая. Нами произведены расчеты процессов установления (классическим методом «в частотной области» [1, 2]) с учетом токов смещения для модели с тонким изолирующим горизонтом, представленной на рис.3, при возбуждении от кругового электрического диполя, и, как не раз случалось при анализе поведения ТМ-поля, был получен поразительный результат. На рис.3 сравниваются две кривые становления (радиальный градиент электрического поля E_r на дневной поверхности, разнос 1500 м, ток в КЭД 1 А). Первая – квазистационарная ($\varepsilon = 0$) и определяется только верхним слоем. Спад – экспоненциальный. Вторая кривая ($\varepsilon = 50\varepsilon_0$) показывает влияние токов смещения – смена знака и медленный, степенной спад в конце процесса становления. Это влияние просто критическое.

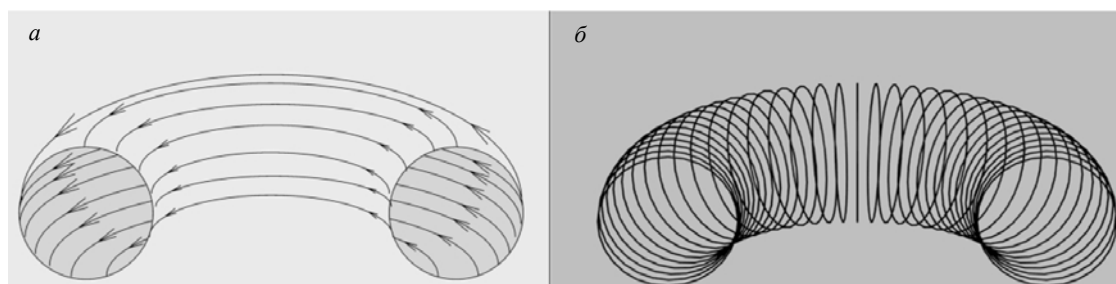


Рис.2. Система горизонтальных токов – поле магнитного типа (а), тороидальная система токов – поле электрического типа (б)

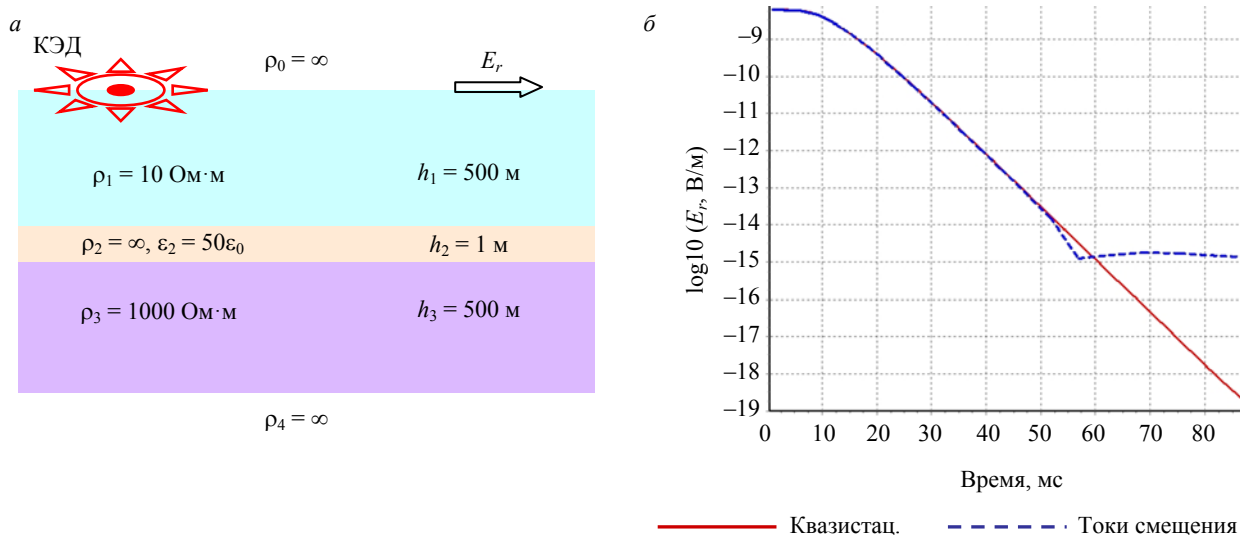


Рис.3. Модель среды (а) и кривые установления (б). Кривая «Квazистац.» – расчет квазистационарной задачи, кривая «Токи смещения» – расчет с учетом токов смещения (E_T)

Результаты эти, полученные численной реализацией метода разделения переменных, были довольно неожиданными, и потребовались дополнительные тестовые расчеты методом конечных элементов [10]. Кроме того, мы специально получили (методом Тихонова «во временной области» [5]) асимптотическую формулу для поздней стадии

$$E_r = \frac{I r_0^2 r \rho^3 \varepsilon^2}{16\pi h^3 \delta h^2 t^2},$$

где сопротивления и мощности верхнего и нижнего слоя одинаковы (ρ, h); δh – мощность изолирующего слоя.

Таким образом, результат на рис.3 тщательно проверен. Дальнейшие расчеты (также довольно нетривиальные, [10]) показали резкую зависимость от сопротивления нижнего слоя.

Геомагнитный эффект. Установление вторичных токов, возбуждаемых контролируемыми источниками, происходит в магнитном поле Земли. Геомагнитное поле (~50 А/м) в тысячи и десятки тысяч раз больше вторичных магнитных полей, возбуждаемых при зондированиях становлением (ЗС). Однако, насколько известно автору, его влияние на сам процесс становления не обсуждалось. Не странно ли это? В физике есть область знаний, где изучается движение заряженных частиц, составляющих ток, в скрещенных электрическом и магнитном (внешнем) полях. Речь идет об эффекте Лоренца и о гальваномагнитных эффектах (например, известный эффект Холла). Стрелка компаса поворачивается в магнитном поле Земли. Это знают все. Система вторичных токов в Земле также обладает магнитным моментом и должна реагировать на магнитное поле Земли (рис.4).

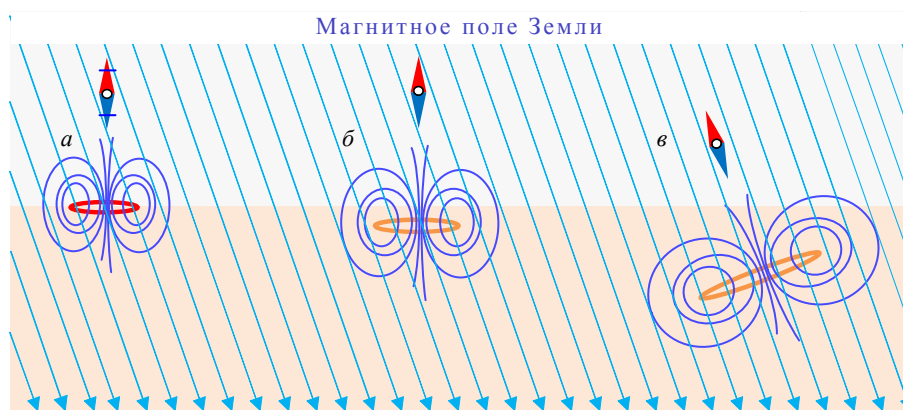


Рис.4. Взаимодействие магнитных диполей с полем Земли: а – ток в петле не выключен (аналог закрепленной магнитной стрелки); б – ток в петле выключен и образовалось вторичное токовое кольцо в Земле (стрелка освобождена); в – магнитный диполь поворачивается в магнитном поле Земли (как и магнитная стрелка)

Самый поверхностный теоретический анализ показывает следующее. Во-первых, геомагнитный эф-



Модель среды

Номер слоя	Мощность, м	ρ_x , Ом·м	ρ_y , Ом·м	ρ_z , Ом·м
1	200	5	5	5
2	100	0,1	1	5
3	∞	100	100	100

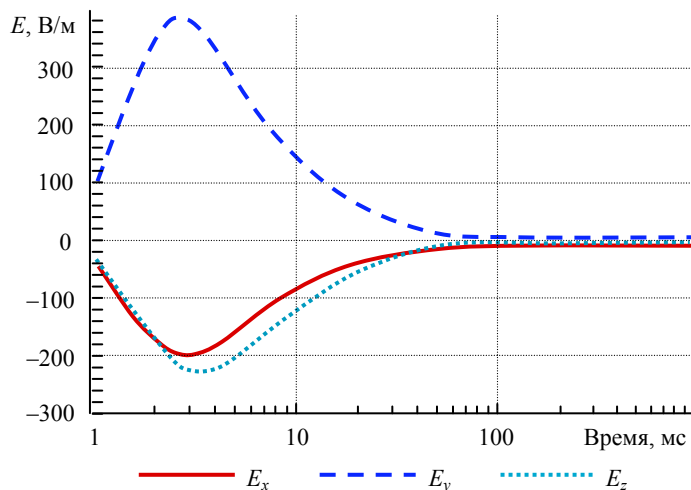


Рис.5. Переходные кривые электрических компонент E_x, E_y, E_z

факт приводит к некоторым эффективным (кажущимся) анизотропии (холловская анизотропия) и вертикальной намагниченности первоначально изотропной, немагнитной среды (геомагнитные эффекты первого и второго рода). Во-вторых, 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.

По мнению автора, уже есть некоторые факты, которые свидетельствуют о проявлении геомагнитного эффекта в электроразведке. Речь идет об известных автору случаях корреляции данных электроразведки методом зондирования становлением с географической ориентацией установки. Разумеется, эти искажения невелики и легко объясняются свойствами геологической среды (латеральной анизотропией).

Однако замалчивание этой проблемы может затруднить прогресс в геоэлектрических исследованиях. Геомагнитный эффект 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. Более подробно об этой проблеме можно узнать из работы [3].

Анизотропия горизонтальных сопротивлений. В прикладных исследованиях для электромагнитного каротажа и электроразведки среда предполагается, как правило, либо изотропной, либо с обычной анизотропией проводимости. Между тем имеется много указаний на то, что среда может обладать даже и двухосной анизотропией, т.е. по всем трем направлениям – X, Y, Z сопротивления различны. Теоретическое решение методом разделения переменных и численная реализация в этом случае связана с рядом проблем [4]. Получены интересные результаты с геоэлектрической точки зрения, например, появление вертикальной электрической компоненты поля при возбуждении горизонтально-слоистого разреза вертикальным магнитным диполем.

В таблице к рис.5 представлен трехслойный разрез, второй слой которого обладает двухосной анизотропией. Источником служит вертикальный магнитный диполь с моментом $M_z = 1013 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, помещенный на дневной поверхности. Наблюдение ведем на глубине 200 м, т.е. на второй границе в точке с координатами $x = 200 \text{ м}, y = 200 \text{ м}$ (поскольку вертикальные сопротивления одинаковы, неважно – снизу или сверху границы). Диапазон регистрации отклика – от 1 мс до 5 с. На рис.5 представлены кривые становления для всех трех компонент электрического поля. Как видим, вертикальная компонента, которая в обычной изотропной или анизотропной с одной осью среде отсутствует, здесь вполне сравнима с горизонтальными.

CSEM (Controlled Source Electro-Magnetic). Еще один феномен хотелось бы отметить – это неожиданная эффективность метода CSEM в глубоком (вот парадокс!) море (например, [7, 8, 10]). Эффективность эта по отношению к объектам повышенного сопротивления, проявляемая погруженной установкой ABMN, легко подтверждается в теоретических расчетах и сохраняется в какой-то мере и на практике. Методу CSEM уже более 10 лет, и он породил целое направление и огромную литературу на Западе, его считают наиболее важным применением электроразведки с контролируруемыми источниками. За это время выдвигалась масса объяснений эффективности метода (например, «волноводы»), но в последние годы принято говорить о поглощении ТЕ-моды

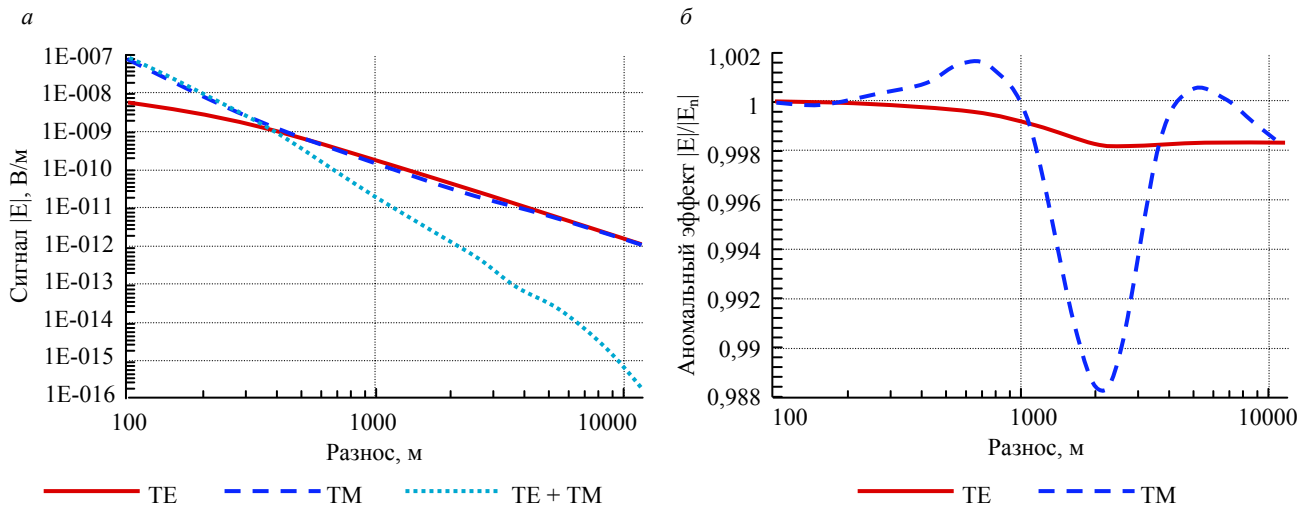


Рис.6. Вклады TE и TM-мод в суммарный сигнал: *a* – отдельные моды и суммарное поле (амплитуды), шифр кривых: TE – вклад TE-моды, TM – вклад TM-моды, TE + TM – суммарное поле; *b* – относительные аномальные эффекты в TE- и TM-моде (амплитуды), шифр кривых: TE – отношение значений TE-моды к TE-моды нормального (без объекта) поля, TM – отношение значений TM-моды к TM-моды нормального (без объекта) поля

в глубоком море и чувствительности TM-моды к «резистивному» объекту. С этим можно, в общем, согласиться, предлагаем лишь сделать дальнейшее уточнение. Примем «стандартную» модель: море, $\rho = 0,3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h = 1000 \text{ м}$, вмещающая среда ниже дна ($\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и объект на глубине 1000 м под дном ($\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h = 100 \text{ м}$). Установка АВМН в гармоническом режиме (ток 1 А, частота $f = 1 \text{ Гц}$) меняет разнос до 12 км. Сделаем расчет сигнала, но, кроме полного, отдельно рассчитаем TE- и TM-моды.

На рис.6, *a* представлены кривые (амплитуды, логарифмический масштаб) для мод и полное поле. На больших разносах моды практически совпадают, а суммарный (TE + TM) сигнал есть результат глубокой взаимной компенсации (моды входят в общий сигнал с разными знаками). Полное поле на несколько порядков меньше, что и приводит к большим аномальным эффектам. На рис.6, *b* представлены аномальные эффекты от «резистивного» слоя в каждой из мод. Обращают на себя внимание малые величины этих эффектов (доли процента), и снова можно отметить, что только глубокая взаимная компенсация мод превращает эти слабые эффекты в отдельных модах в гигантский (до 10000 %) эффект по отношению к суммарному полю. Видно также, что аномальный эффект от «резистивного» слоя гораздо больше в TM-моды, что, вроде бы, соответствует общепринятым представлениям. Однако в области больших разносов (более 5000 м) обнаруживается, что аномальный эффект в полном поле образуется больше за счет TE-поля. Это уже несколько неожиданно. Приходится вспомнить о «волноводной» гипотезе. Волноводов у нас тут нет, ситуация вполне квазистационарная, но можно говорить о распространении TE-моды по высокоомному горизонту.

Итак, ситуация в методе CSEM весьма специфическая. Основной урок для остальной электроразведки состоит в том, что необходимо каким-то образом добиваться максимальной компенсации нормального, фонового, сигнала и создавать таким образом высокий аномальный эффект.

С помощью TM-поля мы можем предложить методику, чувствительную к высокоомным, а также к низкоомным аномальным объек-

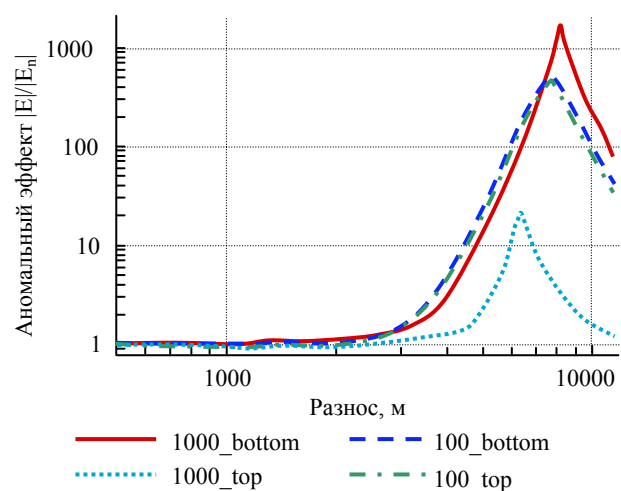


Рис.7. Кривые отношений полного поля E_r КЭД к нормальному (аномальный эффект). Шифр кривых: 1000_bottom и 100_bottom – КЭД на дне моря глубиной соответственно 1000 и 100 м; 1000_top и 100_top – КЭД на поверхности моря глубиной соответственно 1000 и 100 м

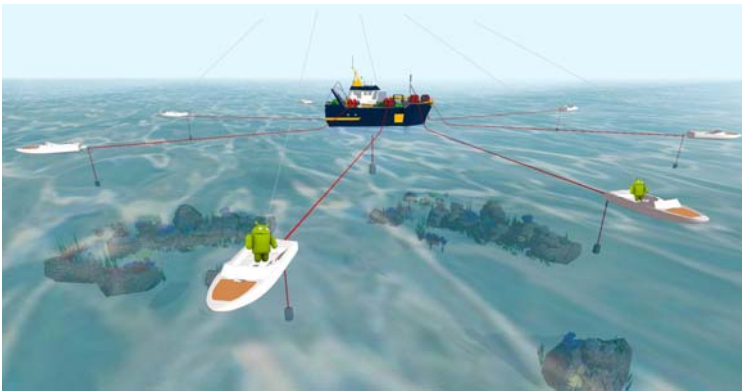


Рис.8. Морская установка КЭД

там, более детальную и не зависящую радикально от глубины моря. Продемонстрируем это, используя все ту же модель (см. рис.1). Применим установку КЭД с радиусом 500 м, работающую в гармоническом режиме на частоте 1 Гц.

В расчетах мы рассматривали море глубиной 1000 и 100 м и помещали КЭД на дно и на дневную поверхность (рис.7). Аномальный эффект велик, не хуже чем в CSEM. Только в случае размещения КЭД на поверхности моря глубиной 1000 м аномальный эффект

падает до 2000 %, но ведь это тоже немало. Разносы в этом примере, конечно, велики. Но, как показано в статье [10], в режиме становления можно использовать небольшие разносы и точно определять границы объекта по латерали.

Получается, что круговой электрический диполь, «плавающий» на поверхности моря, вполне нас устраивает во всех случаях (мелкое и глубокое море), учитывая, что он практически не ограничен по размерам и мощности. Это значит, кстати, что 70 % поверхности земного шара доступны для эффективных единообразных электромагнитных зондирований. Что касается технической реализации, то нетрудно представить себе оперативную инсталляцию КЭД посредством восьми роботизированных катеров-буев, которые разматывают нетонущие кабели с лебедок на центральном судне и затем устанавливают и поддерживают положение электродов под контролем спутниковых сигналов (рис.8).

Еще одно интересное применение КЭД, которое снимает и возражения против сложного по традиционным меркам устройства этого источника, состоит в размещении большой установки КЭД на многолетнем льду, дрейфующем в арктической области.

Заключение. Итак, даже из ограниченного личного опыта автора следует, что рано говорить о «конце истории». И рано смиряться со скромной ролью электроразведки с искусственными источниками в геофизической практике. Мы еще даже не освоили все возможности, которые подразумеваются совершенно классической теорией зондирований становлением. Оптимизировав свою экспериментальную схему на базе ТМ-поля, мы могли бы, наконец, привлечь сложные модели геологической среды.

Благодарность. Автор признателен М.Г.Персову, Ю.Г.Соловейчику и М.Гольдману за сотрудничество по некоторым проблемам, затронутым в статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109 с.
2. Могилатов В.С. Импульсная геоэлектрика. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2014. 182 с.
3. Могилатов В.С. О влиянии геомагнитного поля на процесс установления токов в земле // Геофизика. 2013. № 4. С. 70-75.
4. Могилатов В.С. Учет двухосной анизотропии проводимости среды в геоэлектрических исследованиях / В.С.Могилатов, А.Н.Беспалов // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. 2009. № 9. С. 97-103.
5. Тихонов А.Н. О становлении электрического тока в неоднородной среде / А.Н.Тихонов, О.А.Скугаревская // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геоф. 1950. Т. 14. № 4. С. 281-293.
6. Bhattacharyya B.K. Electromagnetic fields of a transient magnetic dipole on the earth's surface // Geophysics. 1959. 24. P. 89-108.
7. Constable S. An introduction to marine controlled source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration / S.Constable, L.J. Srnka // Geophysics, 2007. 72. WA3-WA12.
8. Constable S.C. Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration // Geophysics. 2010. Vol. 75 (5). P. 75A67-75A81.
9. Displacement currents in geoelectromagnetic problems / V.Mogilatov, M.Goldman, M.Persova, Y.Soloveichik // Journal of Applied Geophysics. 2014. Vol. 105. P. 133-137.
10. Signal detectability of marine electromagnetic methods in the exploration of resistive targets / M.Goldman, V.Mogilato, A.Haroo, E.Levi, B.Tezkan // Geophysical Prospecting. 2015. 63. P. 192-210.
11. Wait J.R. Electromagnetic response of a thin layer // Electronics Letters. 1986. Vol. 22. N 17. P. 898-899.

Автор В.С.Могилатов, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, mvecs@ya.ru (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия).

Статья принята к публикации 03.11.2016.