

УДК 550.837

ЭФФЕКТИВНАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА В МОРЕ: CSEM И ДРУГИЕ МЕТОДЫ

В.С. Могилатов

Аннотация. Морской метод CSEM (controlled source electromagnetic method) является некоторым прорывом в электроразведке с контролируруемыми источниками. Он показывает уникальную разрешающую способность при определенных условиях применения. Весьма поучителен анализ причин его высокой эффективности. Но этот анализ показывает также ограниченность применения CSEM. Весьма желательна более универсальная альтернатива этому методу. Такая альтернатива усматривается в применении «чистого» ТМ-поля.

Ключевые слова. Морская электроразведка, CSEM, ТМ-поле, вертикальная электрическая линия, круговой электрический диполь.

Abstract. The marine method CSEM (controlled source electromagnetic method) is some breakthrough in the electrical prospecting with the controlled sources. It shows a unique resolution under certain conditions. Analysis of the causes of its high efficiency is very instructive. But the analysis also shows the limitations of CSEM. Highly desirable to have the more versatile alternative to this method. This alternative is seen in the use of the pure TM-field.

Key words. Marine electrical prospecting, CSEM, TM-field, vertical electric line, circular electric dipole.

ВВЕДЕНИЕ. Методу CSEM (controlled source electromagnetic method) уже более десяти лет, и он породил целое направление и огромную литературу на Западе, считаясь наиболее важным применением электроразведки с контролируруемыми источниками. Это некоторый электроразведочный феномен – невероятная эффективность метода CSEM (например, [Constable and Srnka, 2007], [Goldman et al., 2015]). Эффективность эта по отношению к объектам повышенного сопротивления, проявляемая в глубоком (вот парадокс!) море погруженной установкой АВМН, легко подтверждается в теоретических расчетах и сохраняется в какой-то мере и на практике. Такое отдельное положение метода ставит довольно острый вопрос – это уникальная ситуация или другие методы электроразведки устроены слишком не оптимально? За это время выдвигалась масса объяснений эффективности метода (например, «волноводы»), но в последние годы принято говорить о поглощении ТЕ-моды в глубоком море и о чувствительности ТМ-моды к «резистивному» объекту. Модовый подход в геоэлектрике, вообще, весьма конструктивен (например, [Могилатов, 2014]), но в данном случае следует уточнить. Уточнение состоит в том, что в случае CSEM происходит уникальная взаимная компенсация «нормальных» ТЕ- и ТМ-мод. Конечно, на уникальность ситуации с CSEM прозрачно указывает зависимость эффекта от глубины моря. В неглубоком море эффективность эта пропадает.

В связи с критической зависимостью эффективности CSEM от среды (глубины моря) и другими ограничениями необходим поиск альтернатив для CSEM. Такой альтернативой могут служить методики, основанные на применении чистой ТМ-моды. Такие попытки уже были – применение вертикальной электрической линии (ВЭЛ). Однако ВЭЛ – довольно-таки проблемный источник. Можно пред-

ложить другой источник ТМ-поля – круговой электрический диполь (КЭД). Он сложнее в реализации, но более надежен для возбуждения и поддержания ТМ-поля.

CSEM на самом деле эффективно

Теоретическая эффективность CSEM легко проверяется расчетами. Для читателя, не слишком знакомого с результатами CSEM, приведем здесь расчеты для «стандартной» ([Constable and Srnka, 2007], [Goldman et al., 2015]) модели: море ($\rho = 0.3$ Ом·м, $h = 1000$ м), вмещающая среда ниже дна ($\rho = 1$ Ом·м) и объект на глубине 1000 м под дном ($\rho = 100$ Ом·м, $h = 100$ м). Установка АВМН в гармоническом режиме ($f = 1$ Гц) меняет разнос до 12 км (рис. 1). Результаты представлены на рис. 1 в виде кривых отношений полного поля к нормальному (без объекта повышенного сопротивления) и крайне впечатляют. Для бесконечно глубокого моря аномальный эффект достигает 1000 раз (т.е. 100000%!). Для моря глубиной 1000 м эффект 10000%. Конечно, эти цифры всего лишь показательны, на практике это значит, что мы будем измерять чистый аномальный эффект. А вот для 100-метрового моря эффект падает до 20-30%. Вполне очевидно, что эффективность CSEM критически зависит от глубины моря. Другое досадное обстоятельство – необходимость больших разнов (до 10000 м).

Малоглубинное применение CSEM

Заметим, если это еще никто не отмечал, что метод CSEM можно применять и в мелком море при соблюдении электродинамического подобия в задаче. Мы должны удовлетворить условию

$$\frac{\mu f}{\rho} h^2 = \text{const.} \quad (1)$$

Например, если уменьшим масштаб в 10 раз, то можем исследовать объект с той же эффективностью

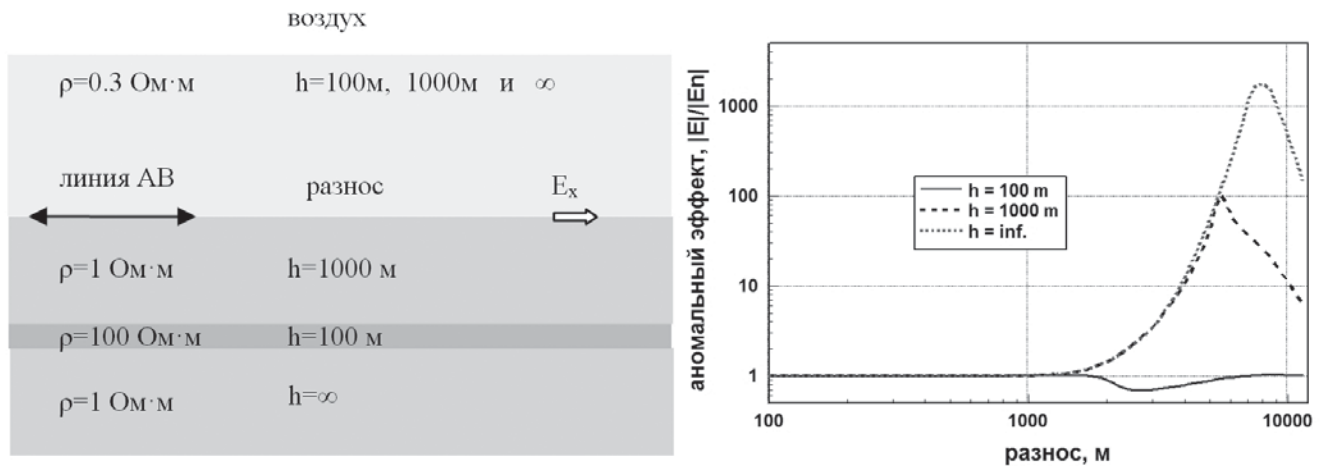


Рис. 1.

Разные глубины моря и соответствующие кривые отношений в зависимости от разнosa. $f = 1$ Гц

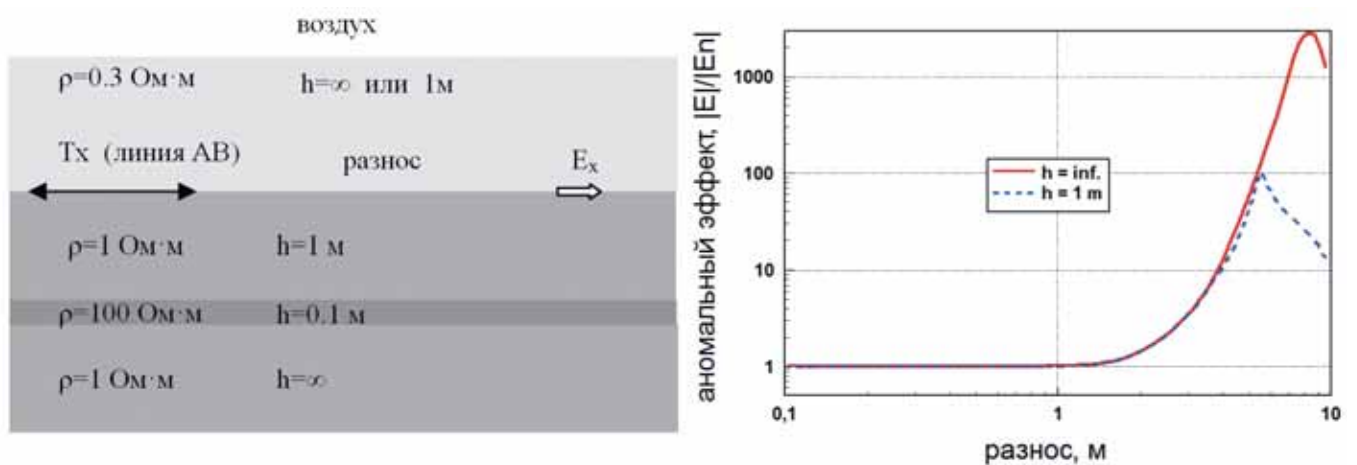


Рис.2.

MicroCSEM. Модель для малоглубинной придонной электроразведки и кривые отношений. $f = 1$ МГц

на глубине 100 м под дном 100-метрового моря при тех же сопротивлениях среды и объекта. Мы снова получим аномальный эффект до 10000%, только при этом должны использовать частоту 100 Гц и разносы до 500–1000 м.

На рис. 2 представлены расчеты для совсем маленькой установки, вроде тех, что используются в малоглубинной придонной электроразведке. Тут всегда море можно считать бесконечно глубоким. Объект, мощностью 10 см находится на глубине 1 м. Т.е. мы уменьшили масштаб в 1000 раз. Теперь мы должны использовать частоту 1 МГц и разносы до 10 метров. И, конечно же, расчеты, представленные на рис. 2 для «бесконечного» моря и для глубины моря 1 м, просто повторяют результаты на рис. 1.

Моды и компенсация мод

Еще раз обращаем внимание на то, что эти результаты совершенно выходят за рамки возможностей других методов электроразведки, включая и метод переходных процессов. В наземной электроразведке работают с аномалиями в 10 и менее процентов. Так что этот феномен нуждается в тщательном анализе. Первый шаг в объяснении довольно очевиден – говорят о поглощении ТЕ-моды в глубоком море

и чувствительности ТМ-моды к высокоомному объекту. Напомним читателю, что горизонтальная электрическая линия (ГЭЛ) возбуждает в слоистой земле две поляризации электромагнитного поля. В наземной электроразведке ТЕ-мода («волна по воздуху») имеет большое преобладание в отклике над ТМ-модой, и свойства ТМ-поля не проявляются.

Но верно ли и достаточно ли такое объяснение? Сделаем снова расчет сигнала для «стандартной» модели (рис. 1), но теперь, кроме полного отклика, отдельно рассчитаем ТЕ- и ТМ-моды, составляющие полный сигнал.

На рис. 3 представлены кривые (амплитуды) полного сигнала и отдельно для мод. Амплитуды ТЕ- и ТМ-мод, практически, совпадают на больших разносах, а суммарный (ТЕ+ТМ) сигнал есть результат глубокой взаимной компенсации (моды входят в общий сигнал с разными знаками). Полное поле на несколько порядков меньше на больших разносах, что и создает условия для огромных аномальных эффектов. Другими словами, и без отсылки к модовому подходу, можно констатировать, что в проводящем пространстве, образованном морской водой и нижним полупространством, первичное поле источника затухает на больших разносах, и на этом

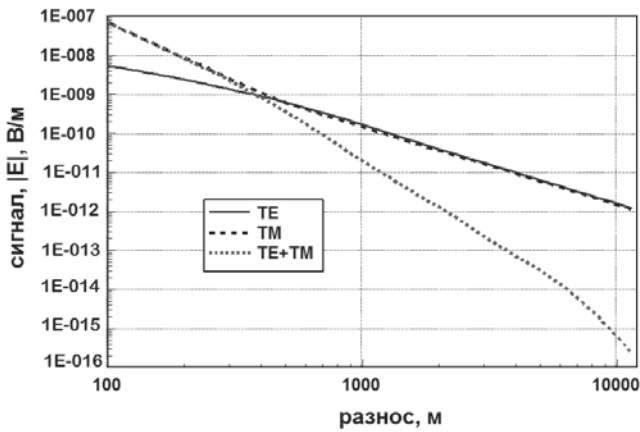


Рис. 3.

Вклады TE и TM-мод. Отдельные моды и суммарное поле. Глубина моря 1000 м

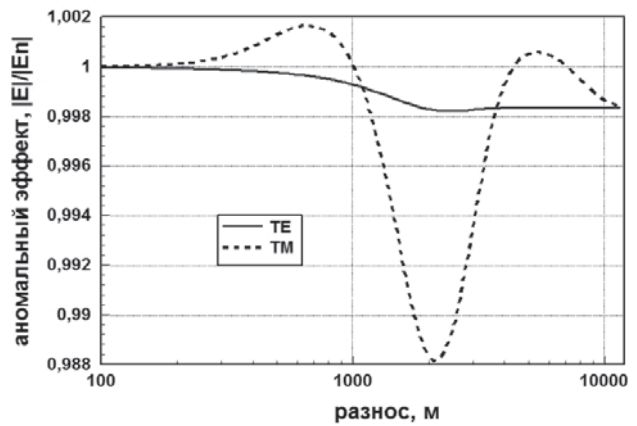


Рис. 4.

Относительные anomальные эффекты в TE- и TM-мод. Глубина моря 1000 м

ослабленном фоне ярко проявляются аномалии.

Однако есть следующий вопрос – какая из мод все же дает основной anomальный эффект. Сделаем расчет anomального эффекта отдельно для каждой из мод (модель все та же, глубина моря 1000 м).

На рис. 4 представлены относительные anomальные эффекты в TE- и TM-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 100000%) эффект по отношению к суммарному полю. Видно, что anomальный эффект от «резистивного» слоя гораздо больше в TM-мод, что, вроде бы, соответствует общепринятым представлениям. Однако, если обратиться к рис. 1 и принять во внимание кривую для глубины моря 1000 м, то обнаруживается, что anomальный эффект в полном поле максимален в области (разнос 5500 м) малого эффекта в TM-поле и, таким образом, 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 anomальный эффект.

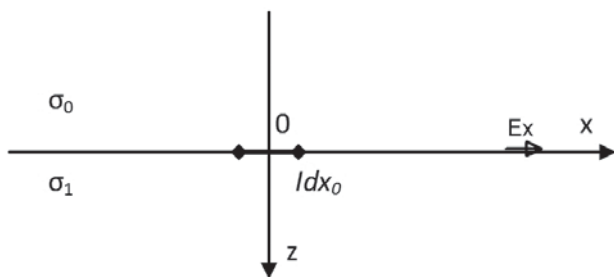


Рис. 5.

Приемно-питающая установка CSEM на границе двух проводящих полупространств

Простой теоретический анализ

Выше мы использовали конкретные расчеты для анализа характера чувствительности CSEM. Подкрепим наши выводы несложным теоретическим анализом. Выделим наиболее простую геоэлектрическую ситуацию (рис. 5) для применения метода CSEM – два проводящих полупространства. Рассмотрим известное (например, [Уэйт, 1987]) интегральное выражение для электрического поля от горизонтального электрического диполя на поверхности Земли, именно E_x на оси x ($y=0$) в следующем виде:

$$E_x = -\frac{Idx}{2\pi} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\infty} J_1(\lambda r) V'_z d\lambda + \frac{i\omega\mu_0}{r} \cdot \int_0^{\infty} J_1(\lambda r) X d\lambda \right\}, \quad (2)$$

где функции (моды) X и V на плоскости раздела есть:

$$X(z) = -\frac{1}{u_0 + u_1}, \quad V'_z(z) = -\frac{u_0 u_1}{\sigma_1 u_0 + \sigma_0 u_1}. \quad (3)$$

Здесь $u_i^2 = \lambda^2 + k_i^2$, $k_i^2 = -i\omega\mu_0\sigma_i$, Idx – момент ГЭД, $r^2 = x^2 + y^2$.

Будем последовательно рассматривать поле как сумму двух мод. Модовый подход, может быть, не выглядит необходимым для этой простой модели, но он крайне полезен при рассмотрении более сложных ситуаций, а также для создания общего взгляда на возможности разных источников. Выделим два случая (при $y = 0, z = 0, x \equiv r$).

1) $\sigma_0 = \sigma_1$ (однородное пространство).

$$X = \frac{1}{2u}, \quad V'_z = -\frac{u}{2\sigma}. \quad (4)$$

$$E_x = \left\{ -\frac{Idx}{4\pi\sigma r^3} \left[kr + e^{-kr} (2 + kr) \right] \right\}_{TM} + \left\{ \frac{Idx}{4\pi\sigma r^3} kr (1 - e^{-kr}) \right\}_{TE} = -\frac{Idx}{2\pi\sigma r^3} \cdot e^{-kr} (1 + kr). \quad (5)$$

2) $\sigma_0 = 0$ (верхнее полупространство – воздух).

$$X = -\frac{1}{k^2} (u - \lambda), \quad V'_z = -\frac{u}{\sigma}, \quad (6)$$

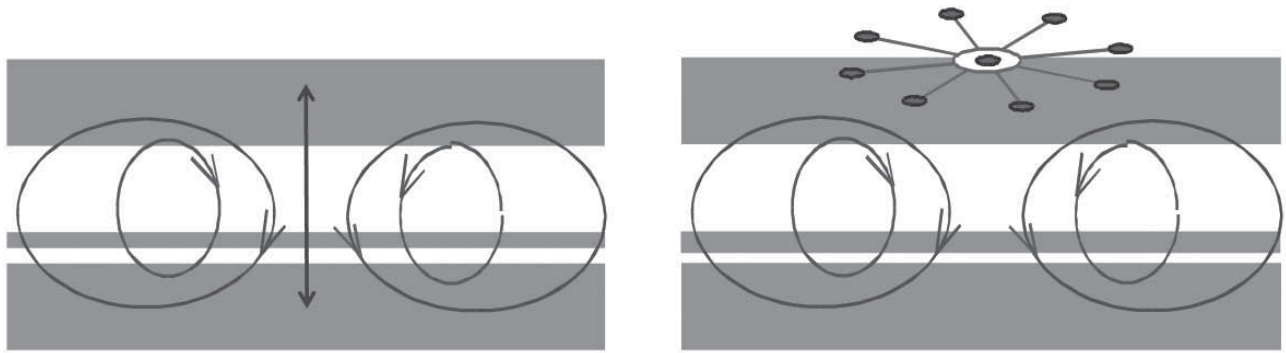


Рис. 6.
Электрические поля ВЭЛ и КЭД в становлении (в разрезе)

$$E_x = \left\{ -\frac{Idx}{2\pi\sigma r^3} [kr + e^{-kr}(2 + kr)] \right\}_{TM} + \left\{ \frac{Idx}{2\pi\sigma r^3} (-1 + kr + e^{-kr}) \right\}_{TE} = -\frac{Idx}{2\pi\sigma r^3} \cdot [1 + e^{-kr}(1 + kr)]. \quad (7)$$

В первом случае мы имеем ситуацию (упрощенную) с установкой АВМН в глубоком море. Моды компенсируют друг друга, т.е. при сложении убираются линейные члены, и суммарный сигнал экспоненциально зависит от разноса и среды. Теперь аномальный объект хорошо проявит себя на этом фоне. Во втором случае (АВМН на дневной поверхности) ситуация принципиально другая. Помимо экспоненты есть член, не зависящий от среды. На его фоне отклик от среды теряется, и, тем более, вклад аномального объекта.

Этот небольшой теоретический анализ вполне согласуется с приведенными выше расчетами. Итак, глубокое море нужно для подавления первичного влияния источника в CSEM.

ТМ-мода и возбуждение поля такой конфигурации на практике

Теперь можно констатировать, что высокая теоретическая чувствительность CSEM к высокоомному горизонту является результатом довольно-таки тонкой настройки, результатом взаимной компенсации двух поляризаций электромагнитного поля, каждая из которых имеет весьма разные свойства в отношении других возможных объектов и обстоятельств (негоризонтальные границы, например), помимо искомого «резистивного». Эта «настройка» может быть легко расстроена в реальных условиях. Необходимость глубокого моря, конечно, досадным образом ограничивает применимость метода. Большие разносы не способствуют латеральной детальности метода. Альтернативу можно увидеть в применении поля чисто электрического типа. Дж.Р. Уэйт давно показал [Уэйт, 1986], что именно ТМ-мода чувствительна к высокоомному объекту. Известны два практических способа возбуждать чистую ТМ-моду на переменном токе – посредством вертикальной электрической линии (ВЭЛ) и круговым электрическим диполем (КЭД) ([Могилатов, 2014], [Goldman et al.,

2015]). Источники и структура электрического поля представлены на рис. 6.

Что касается ВЭЛ (предложен для моря впервые О. В. Назаренко, [Назаренко, 1961]), то этот источник применим в море в конфигурации ВЭЛ- E_z (как более устойчивой к наклонам), но обладает рядом недостатков. Один из них довольно очевиден – его длина зависит от глубины моря. Этот вопрос рассмотрен также в [Goldman et al., 2015]. ТМ-поле (в отличие от ТЕ-поля) требует жесткого контроля конфигурации (геометрии) возбуждающего тока. На наш взгляд, этот контроль жестче у «двумерной» конфигурации (КЭД), нежели у «одномерной» (ВЭЛ). КЭД можно применять на суше (Могилатов, 2014) и в море.

С помощью ТМ-поля мы можем предложить методику, чувствительную к высокоомным, а также и к низкоомным аномальным объектам, более детальную и не зависящую радикально от глубины моря. Продемонстрируем это, используя все ту же модель (рис. 1), которую мы использовали выше. Применяем установку КЭД с радиусом 500 м, работающую в гармоническом режиме на частоте 1 Гц.

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

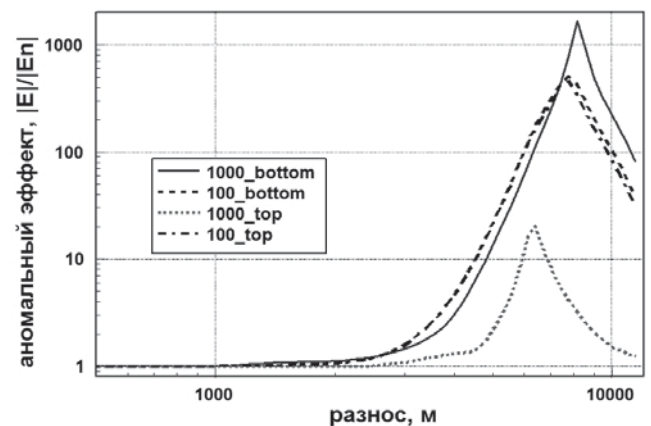


Рис. 7.
Кривые отношений полного поля (E_r) КЭД к нормальному.
1000_bottom – КЭД на дне, море 1000 м;
100_bottom – КЭД на дне, море 100 м;
1000_top – КЭД на поверхности моря (1000 м);
100_top – КЭД на поверхности моря (100 м)

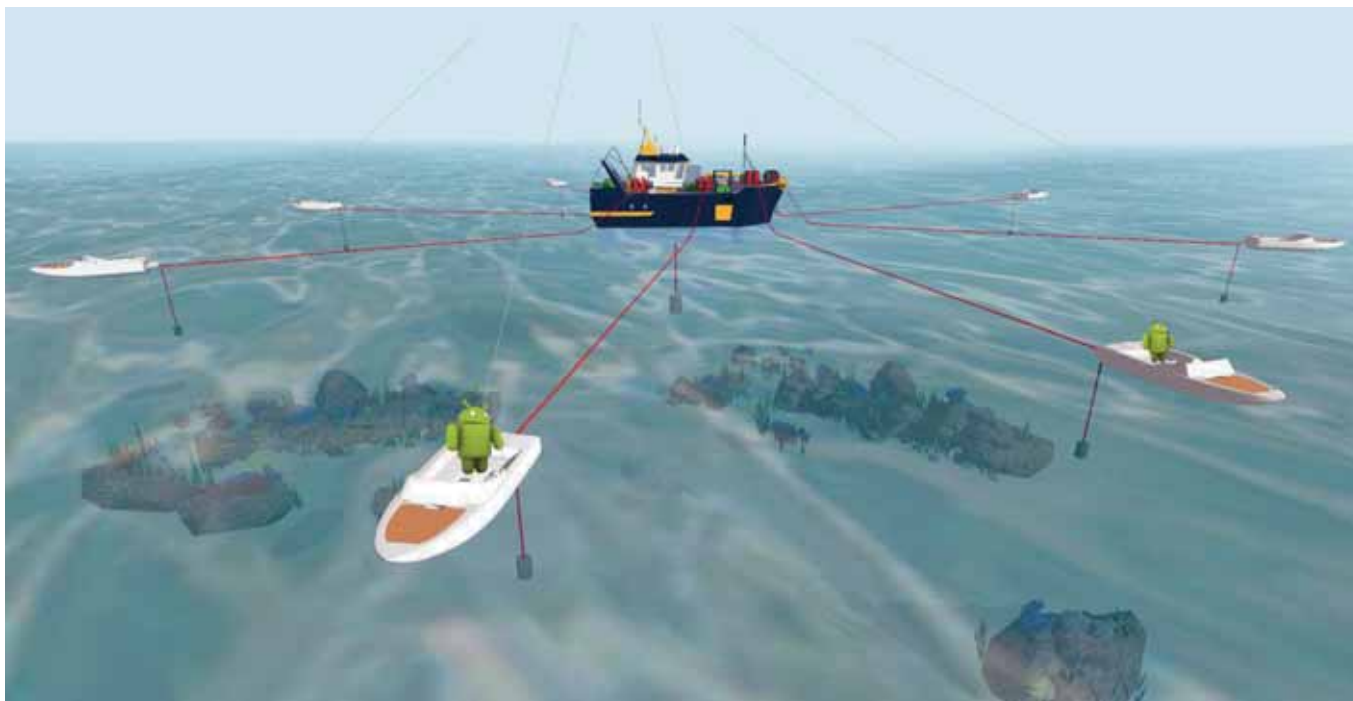


Рис. 8.
«Плавающий» КЭД

КЭД на поверхности 1000-метрового моря аномальный эффект падает до 2000%, но ведь это тоже не мало. Разносы в этом примере, конечно, велики. Но, как показано в [Goldman et al., 2015], 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, кстаги, что 70% поверхности Земного шара доступны для эффективных единообразных электромагнитных зондирований. Что касается технической реализации, то нетрудно представить себе оперативную установку 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).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Высокая эффективность CSEM определяется довольно тонким механизмом, который имеет исключительный характер и не распространяется на другие методы электроразведки (на суше). Это сопровождается довольно жесткими ограничениями на применимость метода. Сильная и универсальная альтернатива состоит в применении чистого ТМ-поля в гармоническом или переходном режиме с использованием кругового электрического диполя, размещаемого на поверхности моря. Может быть, нужно говорить не об альтернативе, а о дополнении быстрого, но довольно неопределенного результата работ CSEM более подробными исследованиями на перспективных участках с использованием КЭД.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 150184 СССР. 1961 г. Устройство для морской электроразведки / Назаренко О. В. Оpubл. 1962 г., бюл. №18.
2. Могилатов В.С. Импульсная геоэлектрика. Новосибирск, Изд. НГУ, 2014, 182 с.
3. Уэйт Дж. Р. Геоэлектромагнетизм. Пер. с англ. М., Недра, 1987, 235 с.
4. Goldman M., Mogilatov V., Haroon A., Levi E. and Tezkan, B. Signal detectability of marine electromagnetic methods in the exploration of resistive targets // Geophysical Prospecting, 2015, 63, p. 192–210.
5. Constable S. and Srnka L.J. An introduction to marine controlled source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration // Geophysics, 2007, 72, WA3–WA12.
6. Wait J. R. Electromagnetic response of a thin layer // Electronics Letters, 1986, V. 22, № 17, p. 898–899.

РЕЦЕНЗЕНТЫ – доктор физико-математических наук
В.А. Шевнин,
кандидат физико-математических наук
А.А. Бобачёв

ОБ АВТОРЕ



МОГИЛАТОВ Владимир Сергеевич

Главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, доктор технических наук, профессор кафедры геофизики НГУ. Область научных интересов – физико-математические основы геоэлектрики с контролируруемыми источниками.