



## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОРСКОЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УВС В ГЛУБОКОВОДНЫХ ЗОНАХ\*

*Авторами представлен вариант морской приповерхностной геофизической установки «источник-приемник», способный работать в глубоководных зонах, оценены плюсы и минусы разработанного метода. Такой подход может послужить одним из возможных путей дальнейшего развития морской геоэлектрической разведки*

*The authors submitted draft of the geophysical sea near surface system “source-receiver, able to work in deep water areas, assessed the pros and cons of the method developed. This approach may serve as one of the possible ways of further development of marine geoelectric exploration*

**Ключевые слова:** глубоководный шельф, приповерхностная геофизическая установка, токовый кабель, месторождения УВС

**Keywords:** the deep-water shelf, the geophysical sea near surface system, current cable, field of hydrocarbon resources

**П**оиск нефтегазовых месторождений на глубоководном шельфе является одной из актуальных задач современной геологоразведки, что связано со слабой проработанностью этой проблемы, особенно на территориях вечной мерзлоты. Большинство методов современной

морской геофизики предполагают, что источники и приемники электромагнитного поля располагаются вблизи дна, как можно ближе к объектам поиска и разведки [5]. В зарубежной литературе комплекс таких методов получил широкое распространение под названием CSEM – *Controlled Source Electromagnetic Method*.

\* Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ № 13-05-12031-офи\_м

Однако такой подход имеет ряд недостатков, связанных как с экономической эффективностью (высокая стоимость оборудования и его эксплуатации), так и со слабой чувствительностью сигналов к объектам исследования [5], трудностью позиционирования систем наблюдения измерений (GPS/ГЛОНАСС плохо функционируют в толще морской воды). Кроме того, численная модель, как правило, упрощается исследователями, что приводит к некорректным результатам [7].

### Проектирование морской приповерхностной геофизической установки

Анализ приповерхностных методов морской электроразведки встречается, как правило, в отечественных публикациях [2, 3] и находит применение преимущественно на мелководном (до 200 м) шельфе. В качестве примера можно привести дифференциальный нормированный метод электроразведки [3], где в качестве источников используется двухэлектродная установка, расположенная на морской поверхности, а измерения проводятся во множестве точек (более 20), также расположенных на поверхности на удалении от источников.

Особенности поведения монохроматического электрического поля в морской воде при использовании двухэлектродной установки в частотном диапазоне «десятки и сотни герц» на малых глубинах описаны в работе [4]. Аналогичный подход использован и в работе [2], с той лишь разницей, что измерения предлагается проводить на морском дне. Необходимость помещения приемников на морское дно обосновывается сложностью измерения электрического поля в движении, а также воздействием ветрового волнения на измерительные электроды.

Однако обе эти проблемы решаемы. Так, измерения можно проводить дискретно – с остановками судна, хотя это и замедлит исследовательский процесс, а измерительные электроды можно заглублять на несколько сантиметров или метров, в зависимости от силы ветра и, как следствия, высоты волн на море. Кроме того, выполненные расчеты показывают, что морское волнение может оказывать отрицательное влияние не только на измерительные электроды, но и на питающие. На рис. 1 показано поведение действительной X-компоненты электрического поля при сильном морском волнении.

Предположим, что двухэлектродная установка с током 1 А, частотой 100 Гц и длиной 24 м расположена на морской поверхности, глубина моря равна 20 м. Волны характеризуются длиной 6 м и амплитудой 1 м. Из результатов

видно, что при заглублении установки на величину базы волны (в данном случае она составляет около 2–3 м) резкие изменения поля вблизи поверхности, связанные с морским волнением, прекращаются, и результаты становятся очень близки к результатам для невозмущенной поверхности. Однако при данной частоте, физических характеристиках и размерах слоя морской воды заглубление на 3 м приводит к ослаблению вторичных источников – объемных зарядов, расположенных преимущественно вблизи морского дна, особенность поведения которых рассмотрена в работе [4].

Целью данной статьи является оценка возможности создания приповерхностного геофизического прибора, работающего при больших величинах слоя морской воды (до нескольких километров), который мог бы сравниться по своей эффективности с придонными установками.

Процесс моделирования переменного электрического поля состоит из нескольких связанных друг с другом этапов:

- построение математической модели;
- получение дискретного аналога построенной модели;
- решение полученной системы линейных алгебраических уравнений.

В работе для моделирования использовался векторный метод конечных элементов.

В морской геоэлектрике чаще измеряют электрическое поле [10]: разные компоненты поля, иногда – их модули или другие математические операции от этих компонент. Принципиально это не влияет на результат, а лишь добавляет в наблюдаемую картину наглядности. Для оценки эффективности той или иной установки этого должно быть достаточно, но в полевых условиях предпочтительно измерять сигнал с максимальной чувствительностью к объекту. В работе [8] при исследовании эффективности CSEM для обнаружения газогидратов на мелководье при частотах тока от 0,5 до 4 Гц были проведены сравнения фазы электрического поля с его амплитудой, которая чаще всего используется при оценке чувствительности метода. Результаты показали, что измерения фазы дают значимо большую реакцию на объекты. Это связано с тем, что значения фазы делают вклад как действительная, так и мнимая компоненты электрического поля, в то время как амплитуда электрического поля почти всегда предполагается только действительная.

Другим важным вопросом в проектировании установки является выбор формы токовых колебаний – прямоугольных или синусоидальных. Прямоугольная форма по-

зволяет увеличить излучение энергии в толщину морской воды, поскольку значения тока находятся на пике амплитуды все время работы установки [9]. Недостатком является невозможность задания в реальных условиях идеальной формы, поскольку требуется время на переключение тока с положительного на отрицательное значение. В работе [9] показано, что использование прямоугольных импульсов на некоторых частотах следования может приводить к существенным различиям между вычисленными и измеренными значениями. Этих недостатков лишено синусоидальное возбуждение.

Для обоснования выбора источника были проведены сравнительные расчеты сигналов от трех основных типов источников – пары токовых электродов, кабеля с током и токовой петли. Глубина слоя морской воды в численном эксперименте составляла 50 м, глубина подстилающей среды – 90 м, высота воздушного слоя – 20 м, ток в источниках – 100 А, частота – 70 Гц, расстояние между электродами, длина токового кабеля и диаметр петли составляли 20 м. На рис. 2 показано распределение действительной составляющей X-компоненты электрического поля для разных типов источников.

Из представленных результатов ясно, что для установки с парой электродов сигнал быстро затухает и на расстоянии больше 100 м от центра электродной пары становится очень слабым и трудноизмерим для приборов. Сиг-

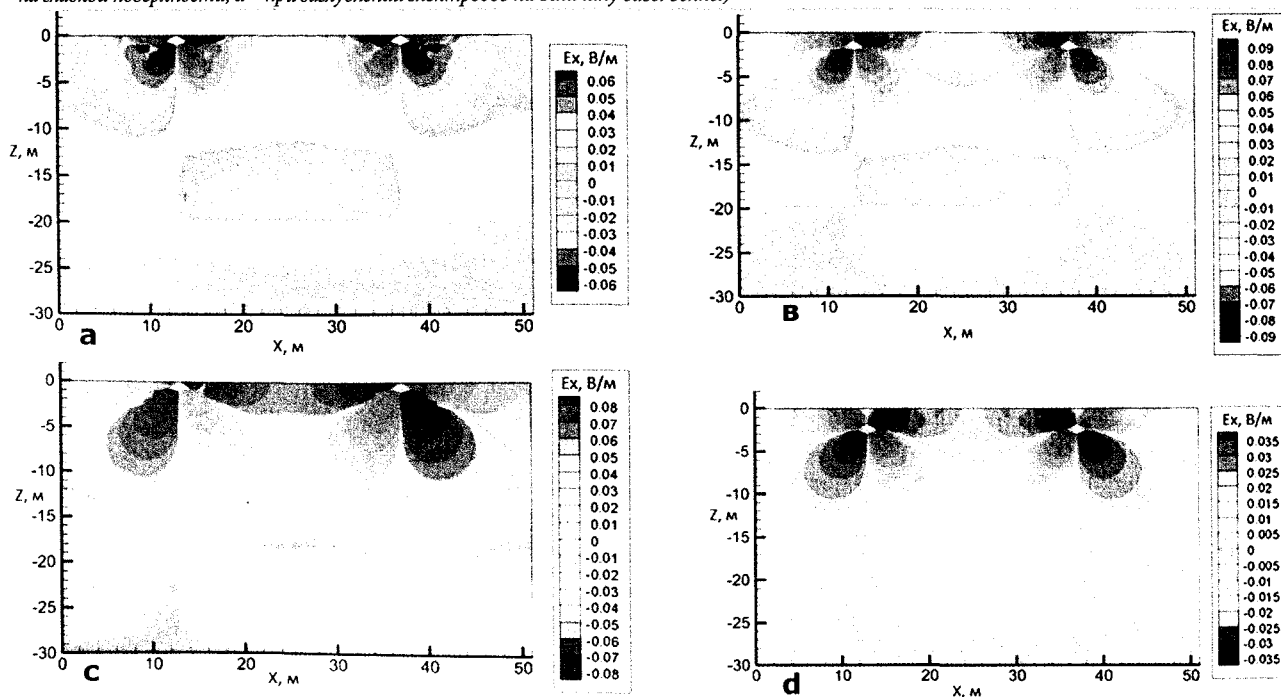
нал от петли с током затухает еще быстрее и на расстоянии выше 100 м от центра петли уже не превышает вычислительной погрешности. И только для кабеля с током на расстоянии больше 100 м от центра кабеля значения действительной X-компоненты электрического поля являются измеримыми и не содержат вычислительный шум из-за слишком малых значений электрического поля. Отчасти недостатки для петли и пары электродов в рассмотренной задаче могут быть исправлены путем перестройки рабочей частоты и увеличения разнеса между электродами и диаметра петли. Однако постоянное увеличение размеров установки делает ее в определенный момент чрезмерно громоздкой, а изменять частоты тока необходимо с оглядкой на то, что некоторые из них могут быть подвержены неустраняемым естественным природным и промышленным помехам [1].

Подведем некоторые промежуточные итоги:

- источники и приемники необходимо заглублять ниже базы морской волны;
- измерения можно проводить дискретно, т.е. после остановки корабля, однако это приведет к замедлению исследовательского процесса;
- эффективность полевых установок, измеряющих амплитуды электрического поля, может быть недостаточной;
- использование прямоугольных волн может приводить к различиям между численными результатами и натурным экспериментом;

Рис. 1.

Поведение действительной X-компоненты электрического поля от двухэлектродной установки, помещенной на поверхность морской воды, в зависимости от положения источников относительно морских волн (расположение электродов: а – на гребнях волн, б – во впадинах волн, с – на гладкой поверхности, д – при заглублении электродов на величину базы волны)



– геометрическое затухание сигнала от кабеля с током при прочих равных условиях не так велико, как от замкнутого контура типа «петля» или пары электродов.

Таким образом, в качестве источника был выбран токовый кабель с гармоническим возбуждением и измерением фазы электрического поля.

**Математическая модель**

Система уравнений Максвелла, описывающих процессы электромагнетизма, в дифференциальной форме имеет вид:

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \\ \text{rot} \vec{H} = \partial \vec{D} / \partial t + \vec{J} + \vec{j}^e \end{cases} \quad \text{div} \vec{D} = \rho \quad \text{div} \vec{B} = 0 \quad (1)$$

где  $\vec{j}$  – плотность вихревых токов (А/м<sup>2</sup>);

$\vec{j}^e$  – плотность сторонних токов электрического типа (А/м<sup>2</sup>);

$\rho$  – плотность электрических зарядов (Кл/м<sup>3</sup>).

Компонентами электромагнитного поля являются четыре вектора, характеризующие поле в среде:

- $\vec{E}$  – напряженность электрического поля (В/м);
- $\vec{D}$  – электрическое смещение (индукция) (Кл/м<sup>2</sup>);
- $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля (А/м);
- $\vec{B}$  – магнитная индукция (Тл). Четыре уравнения Максвелла (1) дополняются тремя уравнениями,

характеризующими свойства среды и устанавливающими связи между  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$ ;  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ ;  $\vec{J}$  и  $\vec{E}$ :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H},$$

где  $\sigma$  – удельная электропроводность (См/м);  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  (Ф/м),  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\mu = \mu_0 \mu_r$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (Гн/м),  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость среды.

При моделировании электрических полей в частотной области будем полагать, что компоненты  $\vec{j}^e$  и  $\vec{E}$  зависят от времени по гармоническому закону:

$$\vec{j}^e = \text{Re}(\vec{j}_e^c + \vec{j}_e^m) e^{i\omega t} = \vec{j}^e e^{i\omega t} \quad \vec{E} = \vec{E} e^{i\omega t} = (\vec{E}^{re} + i\vec{E}^{im}) e^{i\omega t} \quad (2)$$

где  $i$  – мнимая единица,  $f$  – угловая частота,  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота.

Поведение гармонического во времени электрического поля  $\vec{E}$  описывается векторным уравнением Гельмгольца:

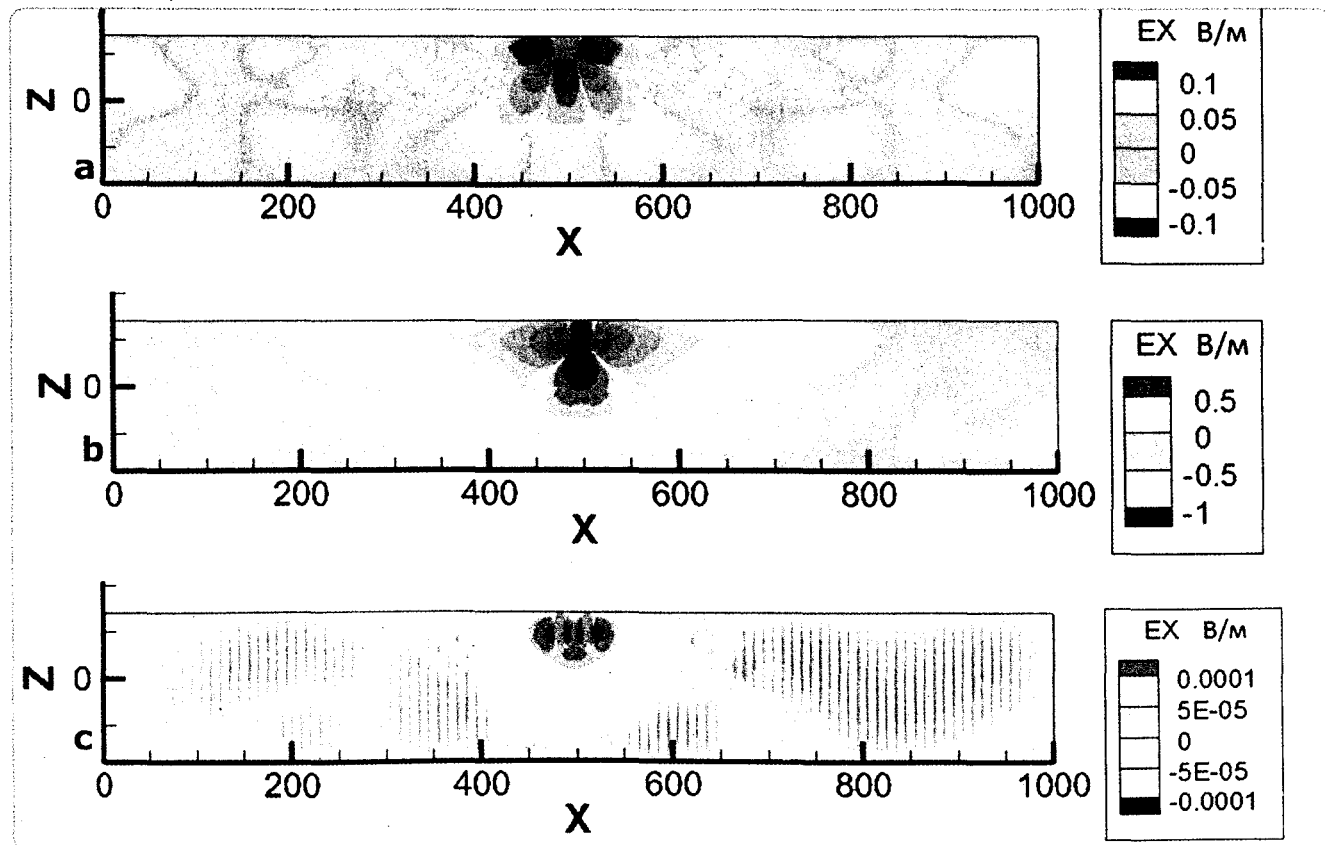
$$\text{rot} \mu^{-1} \text{rot} \vec{E} - k^2 \vec{E} = -i\omega \vec{j}^e \quad (3)$$

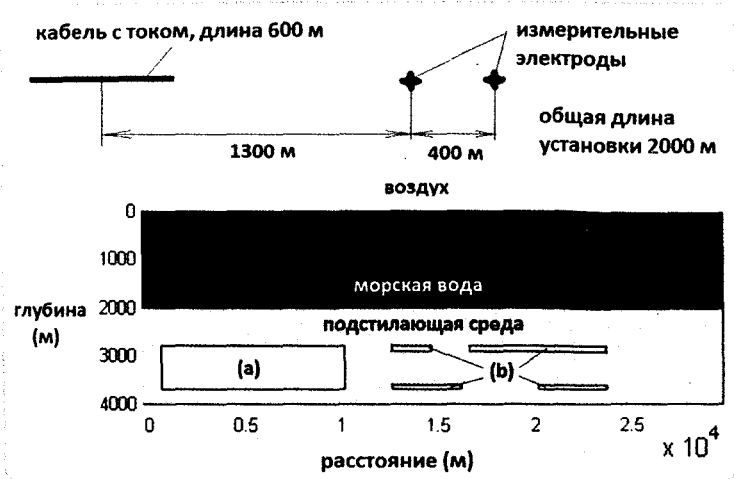
где  $k^2 = \omega^2 \epsilon - i\omega \sigma$  – волновое число. В случае, когда  $\sigma$  – константа, закон сохранения электрического заряда описывается следующим уравнением:

$$\sigma \text{div} \vec{E} + i\omega \epsilon \text{div} \vec{E} = 0 \quad (4)$$

В морской воде электропроводность изменяется с глубиной,  $\sigma = \sigma(z)$ . Остальные характеристики сред, такие как диэлектрическая  $\epsilon$  и магнитная  $\mu$  проницаемости будем считать неизменными

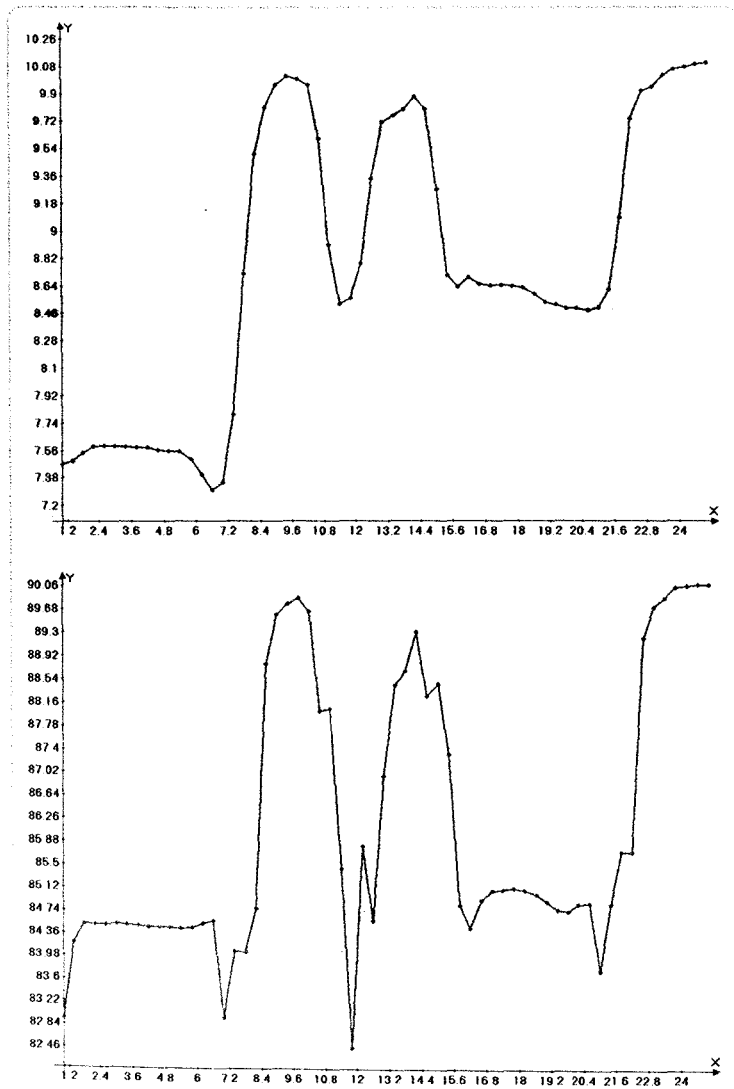
**Рис. 2.** Поведение реальной составляющей X-компоненты электрического поля при разных типах установок (а – пара электродов, б – токовый кабель, с – токовая петля). Z = 0 – дно





**Рис. 3.** Модель среды. Нефтенасыщенные коллекторы: а – соляной купол или карбонат-коллектор; б – пласты-коллекторы

**Рис. 4.** Сигналы для приповерхностной (а) и заглубленной (б) установок (ось X – положение установки, км; ось Y – значение фазы X-компоненты электрического поля в градусах, определенных в области от -90° до 90°) на частоте 1 Гц. Точками обозначены пункты измерений



во всем пространстве. Тогда закон сохранения электрического заряда (4) примет вид:

$$(\partial \sigma(z) / \partial z) E_z + \sigma(z) \operatorname{div} \vec{E} + i \omega \varepsilon \operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad (5)$$

Первое слагаемое в формуле (5) описывает дополнительный заряд, который обусловлен вертикальным изменением электропроводности среды (необходимое условие его появления состоит в наличии ненулевой вертикальной компоненты электрического поля) и, как следствие, способствует увеличению интенсивности электрического поля в среде [4]. Из того же соотношения можно сделать вывод и о том, что задачи морской геоэлектрики необходимо решать в трехмерной области, где ненулевые все три компоненты электрического поля:  $E_x, E_y, E_z$ .

### Тестовая модельная задача

Модельная установка показана на рис. 3.

Измеряемый сигнал – смещение фазы X-компоненты электрического поля относительно тока в источнике. Глубина моря составляет 2000 м. Рассмотрим эффективность установки с токовым (100 А) кабелем на частоте 1 Гц с точки зрения определения количества нефтегазовых месторождений и их объема на примере задачи, которая представлена в работе [6] (рис. 3).

Удельная электропроводность  $\sigma$  морской воды задавалась по аналогии с задачей из [4] – в виде линейной функции (5 См/м на поверхности воды, 7 См/м вблизи дна), электропроводность воздуха – близкое к нулю значение, удельная электропроводность подстилающей среды – 1/3 См/м, удельная электропроводность коллекторов – 1/30 См/м. Было проведено сравнение сигналов при поверхностном и заглубленном расположении установки (рис. 4).

Из результатов видно, что реакция заглубленной установки на объекты оказалась примерно в 3 раза сильнее в сравнении с реакцией приповерхностной установки (наибольший скачок для приповерхностной установки составляет приблизительно 2,7°, в то время как для заглубленной установки почти в 3 раза больше – 7,6°), т.е. для данного типа установки влияние градиентной среды сказывается не столь ярко. Это можно считать плюсом, т.к. точные измерения электропроводности воды в данном случае не так важны, и ее можно задавать как приближенную линейную функцию. Можно также отметить, что заглубленная установка хорошо отслеживает границы объектов (резкие скачки на графике). Однако очевидны и некоторые недостатки заглубленной установки. Например, на графике практически неразличимы объекты разной толщины – соляной купол и пласты-коллекторы идентифицируются примерно одинаково. При использовании приповерхностной уста-

новки на графике различаются объекты с малым содержанием полезных ископаемых (пласты-коллекторы) на фоне соляного купола с большим содержанием полезных ископаемых. Точно оценить количество коллекторов, к сожалению, затруднительно для обоих типов установок.

Проанализируем сигнал на частоте 0,1 Гц (рис. 5).

Из результатов видно, что после понижения частоты до 0,1 Гц реакция установки на объект заметно увеличилась (наибольший скачок на частоте 1 Гц составляет приблизительно  $2,7^\circ$ , в то время как на частоте 0,1 Гц – около  $17^\circ$ ). Этот результат хорошо коррелирует с зарубежными публикациями по методу CSEM, где рабочими для глубин моря в несколько километров являются частоты ниже 1 Гц (как правило – 0,05, 0,1, 0,25 и 0,75 Гц). Кроме того, улучшилась видимость сильно заглубленных пластов-коллекторов. Таким образом, используя несколько проходов геофизического прибора с разной частотой, т.е. метод частотного зондирования, можно уточнять некоторые детали найденного месторождения.

Необходимо отметить, что представленная задача имеет естественный параллелизм, и при наличии многопроцессорного компьютера или нескольких персональных компьютеров полное решение, включая подбор эффективной частоты, будет занимать не больше суток, что приемлемо для работы в полевых условиях.

## Выводы

Представлен вариант морской приповерхностной геофизической установки «источник-приемник», способный работать в глубоководных зонах, оценены плюсы и минусы разработанного метода. Данный подход может послужить одним из возможных путей дальнейшего

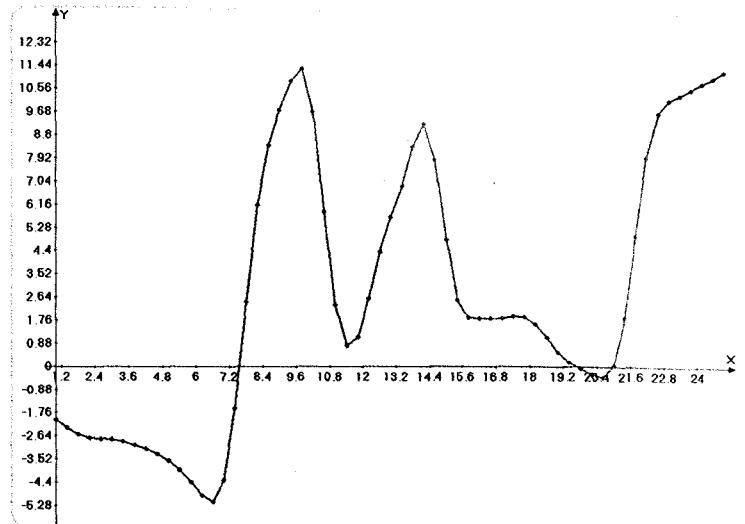


Рис. 5.

Сигналы для приповерхностной установки (ось X – положение установки, км; ось Y – значение фазы X-компоненты электрического поля в градусах, определенных в области от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$ ) на частоте 0,1 Гц. Точками обозначены пункты измерений

развития морской геоэлектрической разведки.

В мире остается все меньше территорий с легкодоступной нефтью, причем под «легкодоступностью» все чаще подразумевается не только легкость самого процесса добычи углеводородов, но и эффективность поиска месторождений. Статистика последнего времени говорит о возрастающем количестве случаев неудовлетворительных результатов разведки месторождений УВС на море (например, бурение «пустых» скважин в 2011 г. на шельфе Каспия компаниями Лукойл и КазМунайГаз) [11].

Авторы работы надеются, что представленный подход сможет способствовать развитию новых эффективных самостоятельных или вспомогательных методов геофизической разведки на море. ■

## Литература

1. Low Level Measurements Handbook. 7th edition. / 2013. 245 p. URL: <http://www.keithley.com/>.
2. Бобров Н.Ю., Кочеров А.Б., Маловичко М.С. Морские электромагнитные зондирования с донными станциями на шельфе Черного моря // Геофизика. 2013. № 4. С. 2–9.
3. Богданов Г.А., Кобзарев Г.Ю. Опыт применения и геологические результаты работ дифференциальным нормированным методом электроразведки на российской акватории Каспийского моря // Геофизика. 2004. № 5. С. 38–41.
4. Мариненко А.В., Эпов М.И., Шурина Э.П. Особенности моделирования электромагнитного поля в прибрежных акваториях морей // Геология и геофизика. Т. 50. 2009. № 5. С. 619–629.
5. Davydycheva S., Rykhlini N. Focused-source electromagnetic survey versus standard CSEM: 3D modeling in complex geometries // Geophysics, Vol. 76, No. 1, January-February 2011. P. F27–F41.
6. Dell'Aversana P., Zanoletti F. Multi-frequency symmetry analysis of marine CSEM data for separating the effects of multiple resistors // EGM International Workshop, April 2010. 4 p.
7. Edelson da Cruz Luz, Cicero Roberto Teixeira Regis. Influence of sea water resistivity on MCSEM data // Revista Brasileira de Geofisica, Vol. 27, No. 3, 2009. P. 349–356.
8. Lim Toon Hoong, Tan Kian Wei. A Synthetic Study on the Feasibility of CSEM Application in Mapping Shallow Hydrates // 8th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, 2010. P. 121–125.
9. Rune Mittet, Tor Schaug-Pettersen. Shaping optimal transmitter waveforms for marine CSEM surveys // SEG/San Antonio Annual Meeting, 2007. P. 539–543.
10. Um E.S., Alumbaugh D.L. On The Physics of The Marine Controlled-Source Electromagnetic Method // Geophysics, Vol. 72, No. 2, March-April 2007. P. WA13–WA26.
11. «Лукойл» пробурил на шельфе Каспия пустые скважины // Industry. 2011. № 9–10. С. 25.