

## ПОДПОВЕРХНОСТНАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ РАЗВЕДКИ НА МОРСКИХ АКВАТОРИЯХ

А.В. Мариненко<sup>1</sup>, М.И. Эпов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

В настоящее время для морской разведки залежей углеводородов широко применяются методы зондирования, связанные с воздействием на вмещающую среду импульсов электромагнитного поля. Разведку осуществляют с помощью расположенных в толще воды исследовательских комплексов, а также сопутствующих им аппаратуры и оборудования. Задачей, решаемой авторами, являлась разработка комплекса аппаратуры и способа морской электроразведки с его использованием, позволяющих с высокой долей вероятности прогнозировать наличие нефтегазового месторождения в подстилающей среде, а также снизить трудоемкость работ по снятию необходимых для этого параметров. Для реализации заявленной задачи предлагается подповерхностное устройство для морской электроразведки во время движения судна. Для определения эффективных частот, сил тока в кабелях, размеров и эффективности установки используются как теоретические знания о работе подобных установок в аналогичных средах, так и численное моделирование разработанной установки. В качестве математического аппарата выбран трехмерный векторный метод конечных элементов.

*Морская геофизика, электроразведочная установка, метод конечных элементов, электрическое поле, удельная электропроводность, электрический заряд.*

## SUBSURFACE GEOELECTRIC ARRAY WITH TWO TRANSMITTERS FOR PETROLEUM EXPLORATION IN OFFSHORE AREAS

A.V. Marinenko and M.I. Eпов

At present, sounding methods based on the effect of electromagnetic pulses on the environment are widely used for marine exploration of hydrocarbon deposits. The exploration is performed using research systems with special equipment fixed in the water column. The goal of this work is to develop equipment and methods for marine electrical prospecting that would allow reliable predictions of petroleum fields in the underlying environment with reduced labor intensity of the necessary surveys. For this purpose, a subsurface array for marine electrical prospecting during vessel movement is proposed. The effective frequencies, current strengths in cables, and the size and efficiency of the array are determined using both the theoretical knowledge of the operation of similar arrays in similar environments and numerical simulation of the developed array. The 3D finite element method is used for mathematical modeling.

*Marine geophysics, electric array, finite element method, electric field, electrical conductivity, electric charge*

## ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Основная проблема морской геоэлектрики заключается в экранирующем эффекте слоя хорошо проводящей морской воды. Наиболее простой способ его подавления заключается в размещении всей установки или ее части (измерительных датчиков) вблизи морского дна [Davydycheva, Rykhlini, 2011]. Такой подход очевиден, но соответствующие технологии требуют весьма сложных и дорогостоящих технических решений. Из-за сильного влияния на измеряемые сигналы электропроводящего слоя морской воды традиционно используемые в наземной электроразведке установки приближают к целевым объектам, размещая их на дне или на небольшом расстоянии от него. Это, безусловно, вынужденное решение при практическом использовании порождает много сложнопреодолимых препятствий, таких как транспортировка установки по неровному морскому дну, неточное ее позиционирование и т. д. Использование подповерхностных установок возможно в случае их слабой чувствительности к слою морской воды и одновременно при достаточном объеме информации в измеренном сигнале для выделения нефтегазовых залежей с определением их структуры, распределения и удельной электропроводности (УЭП).

Аналогичная проблема была в скважинной геофизике, когда стали широко использовать сильно-проводящие биополимерные буровые растворы на соляной основе [Эпов, Антонов, 2000]. В каротаже установка (зонд) находится в пересекающей пласты скважине, заполненной однородным сильнопроводящим буровым раствором. Еще в 70-е годы прошлого века для таких моделей были получены приближенные выражения, описывающие электродвижущую силу (ЭДС) от токового витка малого радиуса (но сравнимого с длиной зонда). При этом предполагалось, что скважина окружена однородной проводящей средой

$$\xi^{(2)}(k_1 r_1, k_2 L) \approx \frac{\xi^{(1)}(k_2 L)}{I_0^2(k_1 r_1)}. \quad (1)$$

Здесь  $\xi^{(2)}$  — ЭДС в двухслойной немагнитной среде (В);  $\xi^{(1)}$  — ЭДС в однородной внешней немагнитной среде (В);  $r_1$  — радиус скважины (м);  $k_1, k_2$  — волновые числа в скважинной внешней среде;  $I_0$  — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка. В квазистационарном приближении предполагаем, что влияние токов смещения мало:

$$k_j^2 = -i\omega\mu_0\sigma_j, \quad j = 1, 2,$$

где  $\sigma_1$  — УЭП буровой жидкости;  $\sigma_2$  — УЭП внешней среды;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость вакуума;  $\omega$  — циклическая частота  $\left[\frac{1}{c}\right]$ ;  $L$  — расстояние между источником и точкой измерения (длина зонда) (м). Сравнительный анализ расчетов по точным выражениям и приближенным формулам показал, что с достаточной для практики точностью соотношение (1) выполняется, если  $|k_1 L|, |k_2 L| > 1$ . Причем точность увеличивается, если  $\sigma_1 > \sigma_2$ .

Второе условие, при котором соотношение (1) достаточно хорошо аппроксимирует сигнал  $\frac{L}{r_1} \geq 5$ , т. е. длина зонда должна быть в несколько раз больше радиуса скважины.

Отметим важную особенность соотношения (1): в логарифмическом масштабе ЭДС в двухслойной среде состоит из суммы двух вкладов — скважины и внешнего пласта:

$$\ln \bar{\xi}^{(2)}(k_1 r_1, k_2 L) = \ln \bar{\xi}^{(1)}(k_2 L) + \ln I_0^2(k_1 r_1), \quad (2)$$

где  $\bar{\xi}^{(1)}$  и  $\bar{\xi}^{(2)}$  — безразмерные ЭДС.

В соотношении (2) второе слагаемое зависит только от параметров скважины, но не зависит от разности  $L$ . Рассмотрим выражение для ЭДС на двух разностях  $L_1, L_2$ :

$$\begin{aligned} \ln |\bar{\xi}^{(2)}(k_1 r_1, k_2 L_1)| &= \ln |\bar{\xi}^{(1)}(k_2 L_1)| + \ln I_0^2(k_1 r_1), \\ \ln |\bar{\xi}^{(2)}(k_1 r_1, k_2 L_2)| &= \ln |\bar{\xi}^{(1)}(k_2 L_2)| + \ln I_0^2(k_1 r_1). \end{aligned}$$

Вычитая из одного равенства другое, получим:

$$\ln |\bar{\xi}^{(2)}(k_1 r_1, k_2 L_1)| - \ln |\bar{\xi}^{(2)}(k_1 r_1, k_2 L_2)| = \ln |\bar{\xi}^{(1)}(k_2 L_1)| - \ln |\bar{\xi}^{(1)}(k_2 L_2)|. \quad (3)$$

Из соотношения (3) видно, что разность логарифмов нормированных ЭДС в этом приближении не зависит от радиуса скважины и УЭП бурового раствора.

Представим измеренные величины через амплитуды  $|\bar{\xi}|$  и фазы  $\varphi$ :

$$\bar{\xi} = |\bar{\xi}| e^{i\varphi}. \quad (4)$$

Тогда соотношение (3) можно переписать в следующем виде

$$\begin{aligned} \ln |\bar{\xi}^{(2)}(k_1 r_1, k_2 L_1)| - \ln |\bar{\xi}^{(2)}(k_1 r_1, k_2 L_2)| &= \ln |\bar{\xi}^{(1)}(k_2 L_1)| - \ln |\bar{\xi}^{(1)}(k_2 L_2)|, \\ \ln \left| \frac{\bar{\xi}^{(2)}(k_1 r_1, k_2 L_2)}{\bar{\xi}^{(2)}(k_1 r_1, k_2 L_1)} \right| &= \ln \left| \frac{\bar{\xi}^{(1)}(k_2 L_2)}{\bar{\xi}^{(1)}(k_2 L_1)} \right|, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\varphi^{(2)}(k_1 r_1, k_2 L_2) - \varphi^{(2)}(k_1 r_1, k_2 L_1) = \varphi^{(1)}(k_2 L_2) - \varphi^{(1)}(k_2 L_1). \quad (6)$$

Таким образом, отношение амплитуд ЭДС и разности фаз, измеренные на двух расстояниях от источника, в этом приближении зависят только от параметров внешней однородной среды.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Вернемся к задаче морской геоэлектрики. Рассмотрим трехслойную геоэлектрическую модель среды с двумя плоскопараллельными границами. Верхний слой непроводящий, средний — сильнопроводящая морская вода, нижний — подстилающее проводящее пространство (геологическая среда). Введем декартову систему координат, для которой плоскость  $xOy$  совпадает с границей между первым и вторым слоем, а ось  $z$  направлена перпендикулярно вниз (рис. 1). Положение границы между первым и вторым слоем описывается уравнением  $\bar{z} = 0$ , а между вторым и третьим  $\bar{z} = h$ . Верхнюю и нижнюю границы будем считать настолько удаленными, что они практически не влияют на вычисляемые поля.

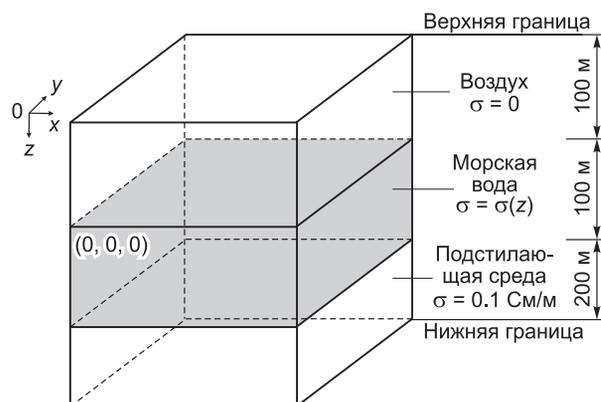


Рис. 1. Геоэлектрическая модель среды.

Воспользовавшись аналогией с задачей каротажа и методом получения приближенного выражения (1), можно записать выражение для ЭДС  $\xi$  на поверхности латерально-однородного слоя морской воды, подстилаемого проводящим полупространством:

$$\xi(k_1, k_2, h, L) \approx \xi(k_2, L) \cdot e^{-2k_1 h}. \quad (7)$$

Здесь  $k_1, k_2$  — волновые числа,  $h$  — толщина слоя морской воды,  $L$  — расстояние между источником и приемником (разнос).

Взяв натуральный логарифм от выражения (7) с учетом безразмерных ЭДС, получим:

$$\ln(\bar{\xi}(k_1, k_2, r, L)) \approx \ln(\bar{\xi}(k_2, L)) - 2k_1 h. \quad (8)$$

Таким образом, можно ослабить влияние слоя морской воды, вычисляя следующую величину:

$$\ln(\xi(k_1, k_2, h, L_1)) - \ln(\xi(k_1, k_2, h, L_2)) \approx \ln(\xi(k_2, L_1)) - \ln(\xi(k_2, L_2)). \quad (9)$$

Как уже было показано выше, эта величина может быть преобразована в разность фаз (6). Задавая разности в установке и вычисляя разность фаз между измерительными электродами, можно существенно уменьшить влияние слоя морской воды.

Вместе с тем указанный подход не учитывает одну уникальную особенность слоя морской воды, а именно неоднородность по глубине его физических свойств, таких как соленость и температура [Edelson da Cruz Luz, Cicero Roberto Teixeira Regis, 2009]. При измерении температуры морской воды на разных глубинах водную толщу условно разделяют на три зоны (рис. 2, слева): поверхностную, слой с температурным скачком — термоклин и глубоководная.

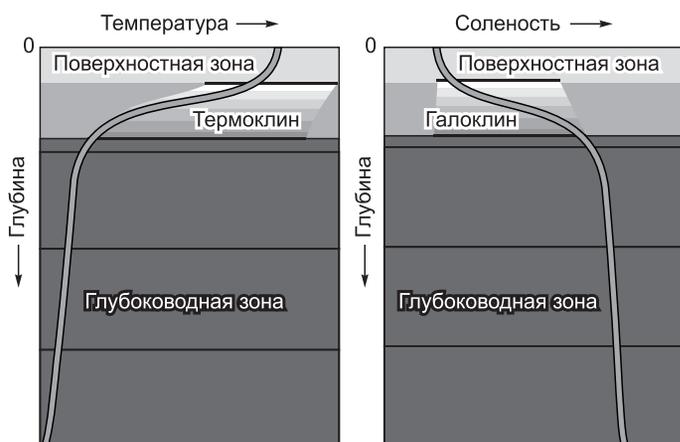


Рис. 2. Изменения температуры и солености воды от глубины.

Изменения температуры в поверхностной и глубоководной зонах менее существенны, чем температурные скачки на термоклине. Это связано с тем, что верхний слой морской воды хорошо перемешивается ветрами, а в глубоководную зону практически не поступает солнечный свет.

При измерении солености на разных глубинах толща морской воды также разделяется на три зоны (см. рис. 2, справа) — поверхностную, слой со скачком солености — галоклин и глубоководную. Причем в одном и том же море в разных местах толщина этих температурных и соленостных зон может быть разной. Традиционно вычисления УЭП морской воды на различных глубинах через ее температуру и соленость выполняются с помощью специальных таблиц [Unesco..., 1981]. Реальные эксперименты показывают,

что обобщенное для больших глубин описание изменения температуры и солености морской воды от глубины с помощью линейных функций зачастую корректно. Если же для электромагнитных зондирований используются источники с ненулевой вертикальной компонентой электрического поля, то в слое морской воды образуется объемный заряд [Мариненко и др., 2009]. В том случае, если УЭП морской воды задается в виде константы, результаты численного моделирования могут оказаться далеки от реальности [Мариненко и др., 2009]. Таким образом, при моделировании необходимо учитывать изменение УЭП морской воды с глубиной.

### ВЫБОР ЗОНДИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

Проведем небольшой сравнительный анализ частотных электромагнитных зондирующих установок. В качестве источников электромагнитного поля в морской электроразведке могут использоваться либо замкнутые контуры с переменным током, либо отрезки изолированных электрических кабелей с токовыми электродами или тороидальными катушками на концах. Они могут находиться либо в горизонтальной (параллельно морской поверхности), либо в вертикальной (ортогонально ей) плоскостях. Источники являются, как правило, подвижными (перемещаются с кораблем), а приемники могут быть как неподвижными, так и передвигаться вместе с источниками на некотором расстоянии от них [Um, Alumbaugh, 2007]. В гальванических источниках (отрезки электрических кабелей) токи (1000 А и более) пропускаются через морскую воду с помощью простой системы электродов (потребляемая мощность около 100 кВт [Constable, Srnka, 2007]). Для получения решений в квадратурах источники конечных размеров часто заменяют на точечные. Следует заметить, что полученные решения прямых задач далеко не всегда удовлетворительно описывают реальные ситуации. Дипольное приближение считается корректным, если расстояние до приемников велико по сравнению с характерными размерами источника [Ландау, Лифшиц, 2006]. В работе [Streich, Becken, 2011] сделана попытка оценить погрешности моделирования, связанные с заменой токового кабеля горизонтальным электрическим диполем. Важным вопросом при сравнительном анализе установок является выбор временной формы сторонних токов — прямоугольных или синусоидальных. В [Connell, Key, 2013] сделана попытка численного сравнения влияния разной формы сторонних токов при поиске нефтегазовых залежей на мелководье. При использовании прямоугольных импульсов в нижнее полупространство направляется максимум энергии, поскольку амплитуда тока максимальна во все время работы установки [Rune, Tor, 2007]. Вместе с тем в реальных условиях технически невозможно мгновенно переключать ток с положительного на отрицательное значение. На это требуется конечное время. На практике это может приводить к модельному несоответствию между измеренными сигналами и их синтетическими аналогами.

Принципиально возможным является использование в качестве источника токовой петли. Однако ее применение наталкивается на ряд технологических трудностей. Мы не будем рассматривать «чисто аномальные» установки, когда источники и приемники ортогональны друг другу [Louise, Gerald, 1995]. При всей привлекательности таких установок в реальных зондированиях практически невозможно обеспечить их ортогональность. Даже при небольших нарушениях этого условия в среде появляются компоненты электрического поля, тесно связанные с УЭП и толщиной слоя морской воды. На практике наибольшее распространение получила установка — плавающий изолированный токовый кабель и набор измерительных электродов. Такой источник возбуждает в среде, в том числе и под морским дном, как вертикальную, так и горизонтальные компоненты электрического тока. В работе будет рассмотрена модификация этого источника путем добавления второго, перпендикулярного к первому, изолированного токового кабеля. Размеры и разносы, а также отношение токов в ее лучах будут определяться исходя из подавления части сигнала слоя от морской воды.

Важной характеристикой любой установки является диапазон операционных частот. Их значения традиционно определяются условием превышения толщины скин-слоя над толщиной слоя морской воды. Исходя из этой оценки, диапазон операционных частот находится в полосе десятые доли герца — сотни герц. Вместе с тем следует помнить, что электрическое поле пропорционально частоте в степени не ниже первой и с ее понижением происходит уменьшение сигнала и увеличивается отношение шум/сигнал [Keithley Instruments..., 2013]. Менее жесткие ограничения накладываются на величину питающего тока, который может изменяться от первых десятков до нескольких сотен ампер.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Выбрав тип установки, нужно определиться с математическим аппаратом, используемым для проведения вычислений. В работе используется трехмерный векторный метод конечных элементов в естественных переменных, который позволяет получать все пространственные компоненты электромагнитного поля и плотности тока в одних и тех же точках. Ниже кратко рассмотрим особенности представленного алгоритма.

Система уравнений Максвелла, описывающих процессы электромагнетизма, в дифференциальной форме имеет вид [Jackson, 1962]:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t & (\text{закон Фарадея}), \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} = \partial \mathbf{D} / \partial t + \mathbf{J} + \mathbf{j}^e & (\text{закон Ампера}), \end{cases} \quad (10)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (\text{закон Гаусса для электрической индукции}),$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (\text{закон Гаусса для магнитной индукции}),$$

где  $\mathbf{J}$  — плотность объемных токов (А/м<sup>2</sup>);  $\mathbf{j}^e$  — плотность сторонних токов (А/м<sup>2</sup>);  $\rho$  — плотность электрических зарядов (Кл/м<sup>3</sup>).

Компонентами электромагнитного поля являются четыре вектора, характеризующие поле в среде:  $\mathbf{E}$  — напряженность электрического поля (В/м);  $\mathbf{D}$  — электрическое смещение (индукция) (Кл/м<sup>2</sup>);  $\mathbf{H}$  — напряженность магнитного поля (А/м);  $\mathbf{B}$  — магнитная индукция (Тл).

Четыре уравнения Максвелла (10) дополняются тремя уравнениями, характеризующими свойства среды и устанавливающими связи между  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{J}$  и  $\mathbf{E}$ :

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H},$$

где  $\sigma$  — удельная электропроводность (См/м);  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  (Ф/м),  $\varepsilon_r$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\mu = \mu_0 \mu_r$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (Гн/м),  $\mu_r$  — относительная магнитная проницаемость среды.

Рассмотрим простейший вариант, при котором все характеристики сред могут быть представлены в виде констант, т. е.  $\sigma = \text{const}$ ,  $\varepsilon = \text{const}$ ,  $\mu = \text{const}$ .

Чтобы решать задачи относительно одного из полей (электрического или магнитного) перейдем к уравнениям второго порядка [Нечаев, Шурина, 2005].

Рассмотрим переход к уравнению второго порядка для вектора напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$ :  $\operatorname{rot} \mu^{-1} \operatorname{rot} \mathbf{E} = -(\partial / \partial t) \operatorname{rot} \mathbf{H}$ .

Из второго уравнения системы (10)  $\operatorname{rot} \mathbf{H} = \varepsilon(\partial \mathbf{E} / \partial t) + \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}^e$ , следовательно:

$$\operatorname{rot} \mu^{-1} \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\varepsilon(\partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2) - \sigma(\partial \mathbf{E} / \partial t) - (\partial \mathbf{j}^e / \partial t). \quad (11)$$

При моделировании электрических полей в частотной области будем полагать, что компоненты  $\mathbf{j}^e$  и  $\mathbf{E}$  полученного уравнения будут зависеть от времени по гармоническому закону:

$$\mathbf{j}^e = \operatorname{Re}(\mathbf{j}_r^e + \mathbf{j}_i^e) e^{i\omega t} = \mathbf{j}^e e^{i\omega t}, \quad \mathbf{E} = \mathbf{E} e^{i\omega t} = (\mathbf{E}^r + i\mathbf{E}^i) e^{i\omega t},$$

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

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

$$\operatorname{rot} \mu^{-1} \operatorname{rot} \mathbf{E} - k^2 \mathbf{E} = -i\omega \mathbf{j}^e, \quad (12)$$

где  $k^2 = \omega^2 \varepsilon - i\omega \sigma$  — квадрат волнового числа. Для непроводящих сред ( $\sigma = 0$ ) эта величина является вещественной, а в квазистационарном приближении — чисто мнимой.

В общем случае область моделирования состоит из подобластей с различными электромагнитными свойствами. Рассмотрим условия непрерывности электрического поля  $\mathbf{E}$  на границах  $\Gamma_{i,j}$ , разделяющих подобласти с различными физическими свойствами. Тогда  $\Omega = \bigcup_i \Omega_i$ , где каждая из областей  $\Omega_i$  характеризуется своими значениями  $\varepsilon_i$ ,  $\mu_i$ ,  $\sigma_i$ . Условия непрерывности электрического поля могут быть представлены следующим образом:

$$[\mathbf{n} \times \mathbf{E}]_{\Gamma} = 0, \quad [\mathbf{n} \cdot (\sigma + i\omega \varepsilon) \mathbf{E}]_{\Gamma} = 0, \quad \text{где } \mathbf{n} \text{ — единичный вектор внешней нормали к границе.}$$

Для корректной формулировки задач моделирования электрического поля уравнение (12) дополняют краевыми условиями. Рассмотрим ограниченную открытую полиэдральную область с Липшиц-непрерывной границей  $\partial\Omega$ . Тогда краевые условия имеют вид:  $\mathbf{n} \times \mathbf{E}|_{\partial\Omega} = \mathbf{n} \times \mathbf{E}_0$ . Однородные краевые условия ( $\mathbf{n} \times \mathbf{E}|_{\partial\Omega} = 0$ ) задаются на границах области, окруженной идеальным проводником.

В качестве конечных элементов были выбраны тетраэдры, поскольку их геометрическая форма позволяет описывать объекты высокой степени сложности (например, антиклинальные ловушки). На ячейках тетраэдральной сетки определяются базисные реберные (edge)-функции, ассоциированные с ребрами сетки конечномерного подпространства  $H^h(\text{rot}; \Omega) \subset H(\text{rot}; \Omega)$  [Nedelec, 1980]. В том случае, когда  $\sigma \neq \text{const}$  (морская вода), функция электропроводности участвует в построении базисных edge-функций, о чем подробнее описано в работе [Мариненко и др., 2009].

### ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Перейдем непосредственно к численным расчетам. Характеризуя каждую подобласть УЭП, модель представляет собой параллелепипед с тремя подобластями-средами — воздух, морская вода и подстилающая среда (рис. 3).

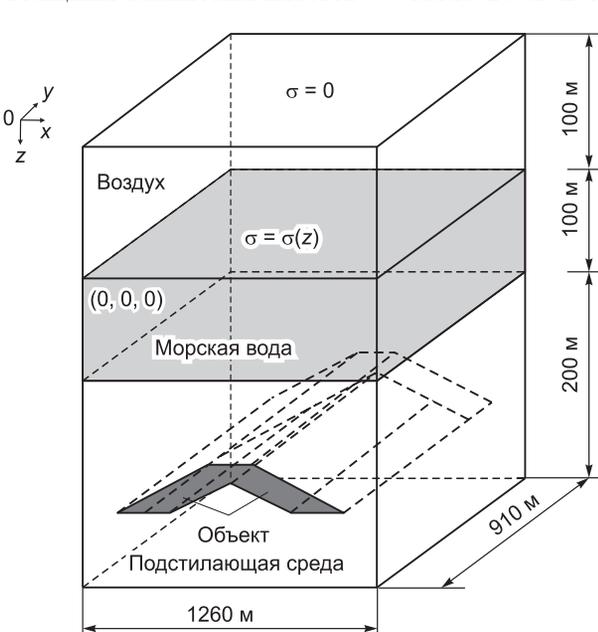
УЭП подстилающей среды 0.1 См/м. Целевой объект представляет собой антиклинальную ловушку, заглубленную на 50 м от границы вода—подстилающая среда, протяженностью 330 м (рис. 4).

Такое подробное описание модели антиклинальной ловушки, учитывающее глинистые флюидоупоры, связано с тем, что, на наш взгляд, последние также могут служить индикатором наличия нефтегазового коллектора. Последний, в силу относительно малых значений УЭП, может слабо проявляться в измеряемых сигналах и не всегда четко выделяется на фоне сигналов от флюидоупора. Дело в том, что глинистый флюидоупор характеризуется пониженными значениями УЭП. Причем, чем ниже его проницаемость, тем меньшими значениями УЭП он характеризуется. Опесчанивание флюидоупора с повышением его проницаемости выражается в понижении значений УЭП. Наличие вторичной пиритизации в отложениях флюидоупора также свидетельствует о процессах диффузии летучих углеводородов и сероводорода в перекрывающие ловушку породы. При этом проявляются процессы электрической поляризации, описываемые с помощью частотной дисперсии (зависимости) УЭП и появлением у нее мнимой составляющей. Таким образом, целью морской геоэлектрики при поисках нефтегазовых ловушек будут не только они сами, но и перекрывающий их электропроводящий флюидоупор.

У водонасыщенного коллектора значения УЭП могут варьироваться [Еров et al., 2002] в промежутке от 1/2 до 1/6 См/м, у нефтенасыщенного — от 1/4 до 1/50 См/м, у газонасыщенного — от 1/30 до 1/200 См/м и, наконец, у глинистых флюидоупоров — от 1/2 до 1/6 См/м. В рассматриваемом случае будем задавать следующие значения:

- водонасыщенный коллектор — 1/4 См/м, глубина 50 м;
- нефтенасыщенный коллектор — 1/40 См/м, глубина 40 м;
- газонасыщенный коллектор — 1/100 См/м, глубина 30 м;
- глинистые пласты — в зависимости от того, с какой средой происходит контакт (при контакте с газом — 1/3 См/м, с нефтью — 1/3.5 См/м, с водой — 1/4 См/м).

Горизонтальные размеры залежи варьируются от 30 до 100 м (у газонасыщенного коллектора), толщины глинистых пластов — около 20 м. В построенной математической модели форма и размер коллекторов идентичны слева и справа относительно вертикальной оси, проходящей через вершину антиклинальной ловушки (см. рис. 4).



коллекторов идентичны слева и справа относительно вертикальной оси, проходящей через вершину антиклинальной ловушки (см. рис. 4).

Распределение электропроводности морской воды варьировалось в зависимости от задачи:

- линейная функция (5 См/м вблизи поверхности воды, 7 См/м у дна) — сильный «градиент» 2 См/м;
- линейная функция (5.5 См/м вблизи поверхности воды, 6.5 См/м у дна) — слабый «градиент» 1 См/м;
- константа (6 См/м по всей глубине) — без «градиента» 0 См/м.

Здесь «градиентом» называется разница значений УЭП вблизи дна и у поверхности воды.

В качестве подповерхностной геоэлектрической установки, как уже упоминалось ранее, выберем пару взаимно-перпендикулярных изолированных кабелей одинаковой длины (500 м) с двумя приемниками, расположенными по одну сторону от источника (рис. 5).

Рис. 3. Модель среды и расчетная область.

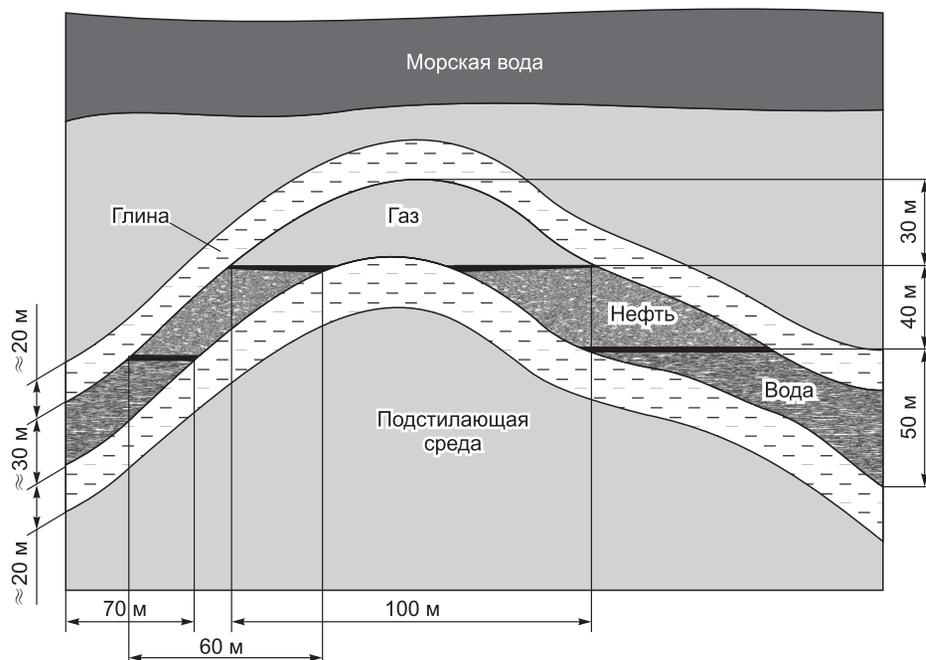


Рис. 4. Модель антиклинальной ловушки.

Подобные параметры установки позволяют применять ранее описанный подход для уменьшения влияния слоя морской воды в модели, изображенной на рис. 3.

Число точек измерения — 9 положений установки над объектом (шаг переменный).

В качестве измеряемого параметра будет вычисляться разность фаз между сближенными точками измерения.

Целью первой серии численных экспериментов являлось определение частоты с максимальной чувствительностью сигнала к объекту. Для чего было выполнено моделирование, начиная с 3 Гц и выше с удвоением последующей частоты. В результате было определено значение эффективной частоты, равное 12 Гц.

Для наиболее достоверной оценки глубинности метода производят численную оценку степени затухания электрического поля в среде над антиклинальной ловушкой. На рис. 6 приведено соотношение амплитуд электрического поля на дневной поверхности и на кровле антиклинальной структуры в зависимости от частоты. Определив минимальное затухание сигнала в частотном диапазоне, устанавливается значение частоты, которое можно назвать «эффективным».

Используя значение эффективной частоты, перейдем к настройке токов в кабелях. Целью настройки является увеличение влияния объекта на измеренный сигнал настолько, чтобы его отклонение от сигнала в среде без объекта максимально возможно превышало уровень погрешности измерений. Настройка выполняется путем изменения тока в кабеле 2, в то время как ток в кабеле 1 остается неизменным (–100 А).

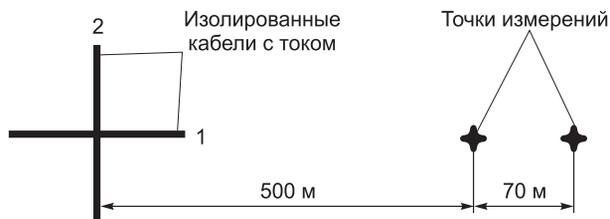


Рис. 5. Модель установки, вид сверху.

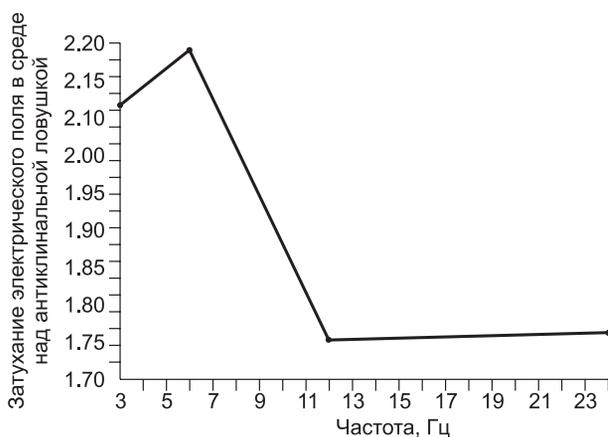
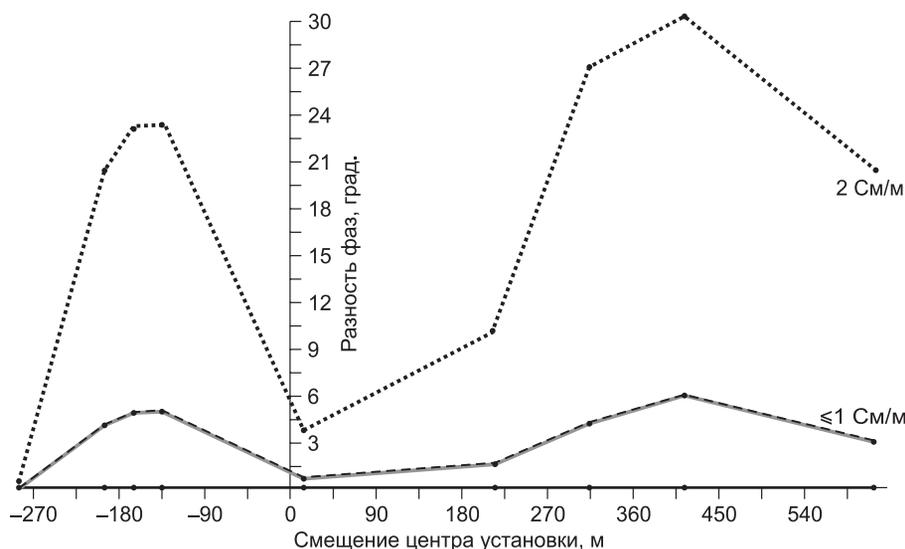


Рис. 6. Соотношение амплитуд компоненты  $E_y$  электрического поля на дневной поверхности и на кровле антиклинальной структуры в зависимости от частоты.



**Рис. 7. Реакция на объект (разность фаз) при градиенте электропроводности морской воды.**

Настройка тока в кабелях проводится таким образом, чтобы в референтной модели измеренная в приемных электродах разность фаз была близка к нулю. Установлено, что в результате выполненных расчетов ток в кабеле 2 зависит от вертикального распределения УЭП в морской воде:

- при разнице в УЭП на поверхности и на глубине 2 См/м — 224.3 А;
- при разнице в УЭП на поверхности и на глубине 1 См/м — 292.9 А;
- для постоянной УЭП — 359.8 А.

Перейдем к окончательному проектированию, цель которого состоит в максимизации реакции установки на объект. Результаты численного моделирования представлены на рис. 7.

Таким образом, удалось обнаружить реакцию на объект, равную  $\sim 30^\circ$  (разность УЭП морской воды 2 См/м) и  $\sim 6^\circ$  (разность УЭП морской воды  $\leq 1$  См/м) (см. рис. 7).

При малом изменении УЭП влияние возникающих в морской воде дополнительных объемных зарядов оказывается недостаточным и реакция на объект ничуть не лучше, чем в случае постоянной УЭП.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, подведем краткие итоги. В данной работе нам удалось эффективно использовать сочетание известного в скважинной геофизике подхода с новым типом источника и особенностями свойств морской воды, которые все вместе дают результат, эффективность последнего соизмерима с лучшими наземными методами электроразведки. Это позволило придать второе дыхание приповерхностным методам морской геофизики, которые, как правило, применялись при очень малых глубинах моря. Мы показали, что при должном подходе приповерхностные геоэлектрические установки способны вести эффективный поиск антиклинальных ловушек, расположенных на глубинах до 150 м от поверхности воды, а возможно, и глубже. Представленный подход, однако, предъявляет к исследователям и рабочим приборам некоторые дополнительные условия. Во-первых, это точность настройки рабочей частоты, что не является проблемой как для современных приборов, так и для численных моделей. И во-вторых, необходимость проведения предварительных измерений в рабочей зоне, а именно определение глубины слоя морской воды (для определения размеров установки), характер градиента ее электропроводности и электропроводность подстилающей среды (для создания точной численной модели). Стоит отметить, что подобные предварительные измерения с той или иной точностью и подробностью проводятся практически для всех методов геоэлектрической разведки.

### ЛИТЕРАТУРА

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория поля. Т. 2. М., Физматлит, 2006, 534 с.
- Мариненко А.В., Эпов М.И., Шурина Э.П. Особенности моделирования электромагнитного поля в прибрежных акваториях морей // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (5), с. 619—629.
- Нечаев О.В., Шурина Э.П. Многосеточный алгоритм решения векторным методом конечных элементов трехмерного уравнения Гельмгольца // Математическое моделирование, 2005, т. 17, № 6, с. 92—102.

- Эпов М.И., Антонов Ю.Н.** Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ СО РАН, 2000, 122 с.
- Connell D., Key K.** A numerical comparison of time and frequency-domain marine electromagnetic methods for hydrocarbon exploration in shallow water // *Geophys. Prospect.*, 2013, v. 61, p. 187—199.
- Constable S., Srnka L.J.** An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration // *Geophysics*, 2007, v. 72, № 2, p. WA3—WA12.
- Davydycheva S., Rykhlinski N.** Focused-source electromagnetic survey versus standard CSEM: 3D modeling in complex geometries // *Geophysics*, 2011, v. 76, № 1, p. F27—F41.
- Edelson da Cruz Luz, Cicero Roberto Teixeira Regis.** Influence of sea water resistivity on MCSEM data // *Rev. Bras. Geofis.*, 2009, v. 27, № 3, p. 349—356.
- Епов М.И., Антонов Ю.Н., Yeltsov I.N.** VIKIZ Method for logging oil and gas boreholes. Novosibirsk, Branch «Geo» of the Publishing House of the SB RAS, 2002, 112 p.
- Jackson J.** Classical electrodynamics. New York, Wiley, 1962, 839 p.
- Keithley instruments.** Low level measurements handbook. 7th edition. 2013, 244 p. URL: <http://www.tek.com/keithley> (дата обращения: 01.08.2016).
- Louise P., Gerald W.H.** A parametric study of the vertical electric source // *Geophysics*, 1995, v. 60, № 1, p. 43—52.
- Nedelec J.C.** Mixed finite elements in  $R^3$  // *Numer. Math.*, 1980, v. 35, № 3, p. 315—341.
- Rune M., Tor S.-P.** Shaping optimal transmitter waveforms for marine CSEM surveys // SEG/San Antonio Annual Meeting, 2007, p. 539—543.
- Streich R., Becken M.** Electromagnetic fields generated by finite-length wire sources: comparison with point dipole solutions // *Geophys. Prospect.*, 2011, v. 59, p. 361—374.
- Um E.S., Alumbaugh D.L.** On the physics of the marine controlled-source electromagnetic method // *Geophysics*, 2007, v. 72, № 2, p. WA13—WA26.
- Unesco.** Background papers and supporting data on the Practical Salinity Scale 1978. Paris, Unesco Technical Papers in Marine Science, 1981, № 37, 145 p.

*Рекомендована к печати 6 декабря 2016 г.,  
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию  
16 августа 2016 г.*