

Научно-теоретический журнал

ISSN 2304-0823



СИ Системная инженерия

№ 2
2015

Издается с января 2015 года

Выходит 4 раз в год

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)



Учредитель, издатель: Малое инновационное предприятия
при ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический
университет им. М.Т. Калашникова»
ООО «Институт интеллектуальных систем управления»



Е-mail издательства: systemsengineer@mail.ru

Сайт издательства: системнаяинженерия.рф / systemsengineer.ru

Почтовый адрес издательства: 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д.7, к.2, ауд. 424

Главный редактор: Лялин Вадим Евгеньевич

Отпечатано:

Издательский центр научного просвещения (ИП Самохвалов Антон Витальевич)

Формат 60x90 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 15.

Подписано в печать: 21.12.2015 г. Тираж: 100 экз. Заказ СИ1502.

© «Системная инженерия», 2015

**Геофизика. Геоинформатика.
Разработка и эксплуатация нефтегазовых месторождений**

Редакционный совет:

Асхабов А.М., академик РАН (Институт геологии Коми научного центра УрО РАН, г. Сыктывкар)
Дмитриевский А.Н., академик РАН, д.г.-м.н., профессор (Институт проблем нефти и газа РАН, Москва)
Коротеев В.А., академик РАН (Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург)
Михайленко Б.Г., академик РАН (Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск)
Золоев К.К., чл.-корр. РАН (ОАО «Уральская геологосъемочная экспедиция», г. Екатеринбург)
Петров В.А., чл.-корр. РАН (Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва)
Уткин В.И., чл.-корр. РАН (Институт проблем управления РАН, г. Москва)
Бахтизин Р.Н., д.ф.-м.н., профессор (УГНТУ, г. Уфа)
Демура Г.В., д.г.-м.н. профессор (РГГРУ, г. Москва)
Никитин А.А., д.ф.-м.н., профессор (РГГРУ, г. Москва)
Пахомов В.И., д.г.-м.н., профессор (РГГРУ, г. Москва)
Овчаренко А.В., д.г.-м.н., профессор (НПЦ «Геонефтегаз», г. Москва)
Хмельевской В.К., д.г.-м.н., профессор (МГУ им. Ломоносова М.В., г. Москва)
Хаматдинов Р.Т., д.т.н., профессор (ОО «Нефтегазгеофизика», г. Тверь)

Редакционная коллегия:

Андреев В.Е., д.т.н., профессор (ИНТИНМ, г. Уфа)
Бондаренко В.М., д.т.н., профессор (РГГРУ, г. Москва)
Верчеба А.А., д.г.-м.н., профессор (РГГРУ, г. Москва)
Гапоненко А.М., д.т.н., профессор (КубГТУ, г. Краснодар)
Игнатов П.А., д.г.-м.н., профессор (РГГРУ, г. Москва)
Коловертнов Г.Ю., д.т.н. (УГНТУ, г. Уфа)
Кузнецов Ю.С., д.т.н., профессор (ИЦ НВМТ РАН, г. Москва)
Кучумов Р.Я., д.т.н., профессор (ТюмГНГУ, г. Тюмень)
Мазуров А.К., д.г.-м.н., профессор (ИПР ТПУ, г. Томск)
Меловзоров Г.В., д.т.н., профессор (УдГУ, г. Ижевск)
Неханов В.М., д.г.-м.н., профессор (ВГУ, г. Воронеж)
Сенилов М.А., д.т.н., профессор (ИжГТУ, г. Ижевск)
Сохошко С.К., д.т.н., профессор (ТюмГНГУ, г. Тюмень)
Тененев В.А., д.ф.-м.н., профессор (ИжГТУ, г. Ижевск)

УДК 550.837.6+550.832

А.В. Мариненко
к.ф.-м.н., м.н.с. ФГБУН СО РАН «Институт
нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука»

М.И. Эпов
д.т.н., профессор, академик РАН, директор ФГБУН СО РАН «Институт
нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука»

НОВЫЙ ПОДХОД В ПРИМЕНЕНИИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ РАЗВЕДКИ НА МОРСКИХ АКВАТОРИЯХ

Аннотация. В настоящее время большинство методов морской геоэлектрики основаны на том, что источники и приемники электромагнитного поля должны располагаться вблизи дна, как можно ближе к объектам поиска и разведки. Высокая сложность аппаратуры и технологии проведения таких работ очевидна. Использование незаглубленных геоэлектрических установок натывается на ряд ограничений, связанных, прежде всего, с экранирующим эффектом слоя морской воды. В данной работе представлен новый подход, позволяющий заметно ослабить влияние слоя морской воды, что позволяет получить реакцию на нефтяное месторождение, сравнимую с заглубленными установками.

Ключевые слова: морская геофизика, конечно-элементный метод, электромагнитное поле, электропроводность, геоэлектрическая установка.

A.V. Marinenko, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and geophysics of Siberian branch of Russian Academy of Sciences

M.I. Epov, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and geophysics of Siberian branch of Russian Academy of Sciences

A NEW APPROACH IN THE APPLICATION OF GEOELECTRICAL UNBURIED PLANTS FOR OIL AND GAS EXPLORATION IN THE SEA AREAS

Abstract. At the present time most of methods of sea electrical exploration are based on the idea that sources and receivers of an electromagnetic field should settle down near to a sea floor as it is possible more close to exploration target. High complexity of equipment and technology of execution of such works is obvious. Using unburied geoelectric plants come across a number of limitations associated primarily with the effect of shielding layer of seawater. This paper presents a new approach, which allows significantly reduce the influence of seawater layer to provide reaction to the oilfield, comparable to the buried plants.

Keywords: marine geophysics, finite-element method, electromagnetic field, conductivity, geoelectric plant.

Основная проблема морской геоэлектрики заключается в экранирующем эффекте слоя хорошо проводящей морской воды. Наиболее простой способ его подавления заключается в размещении части (измерительных датчиков) или всей установки вблизи морского дна [1]. Такой подход очевиден, но соответствующие технологии требуют весьма сложных и дорогостоящих технических решений. В силу сильного влияния на измеряемые сигналы электропроводящего слоя морской воды традиционные установки стараются приблизить к объектам поиска или разведки, размещая их на дне или на небольшом расстоянии от него. Это, безусловно, вынужденное решение при практическом использовании порождает много плохо преодолимых сложностей, таких как транспортировка установки по неровному морскому дну, неточное ее позиционирование и так далее. Использование подповерхностных установок возможно в случае их слабой чувствительности к слою морской воды и, одновременно, при достаточном ко-

личество информации в измеренном сигнале для выделения нефтегазовых залежей и определения их геометрических характеристик и удельной электропроводности (УЭП).

Вспомним, каким образом избавляются от экранирующего эффекта в скважинной геофизике [2]. При геофизических исследованиях в скважинах установка (зонд) находится в среде, заполненной однородным проводящим буровым раствором. Еще в 70-е годы прошлого века для скважинных моделей были получены приближенные выражения, описывающие электродвижущую силу (ЭДС) от малого токового витка (вертикального магнитного диполя). 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 среде; $\xi^{(1)}$ — ЭДС в однородной среде с УЭП окружающей скважину среды; r_1 — радиус скважины; k_1, k_2 — волновые числа; I_0 — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

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

σ_1 — УЭП буровой жидкости; σ_2 — УЭП внешней среды; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума; $\omega \left[\frac{1}{c} \right]$ — циклическая частота; L — расстояние между источником и точкой измерения. Сравнительный анализ расчетов по точным выражениям и приближенным формулам показал, что наиболее точно соотношение (1) выполняется, если $|k_1 L|, |k_2 L| > 1$. Причем погрешность уменьшается, если $\sigma_1 > \sigma_2$.

Второе условие, при котором соотношение (1) достаточно хорошо выполняется $\frac{L}{r_1} \geq 5$, т.е. расстояние между источником и приемником должно 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.

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

В соотношении (2) второе слагаемое зависит только от параметров скважины, но не зависит от величины L . Поэтому можно рассмотреть ЭДС, измеренные на двух расстояниях L_1, L_2 от источника. Они запишутся следующим образом:

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

Вычитая из одного равенства другое, получим:

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

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

Представим измеренные величины через амплитуды $|\xi|$ и фазы φ .

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

Тогда соотношение (3) можно переписать в следующем виде

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

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

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

Таким образом, отношение амплитуд ЭДС и разности фаз, измеренных на двух расстояниях от источника, слабо зависят от параметров однородной среды, в которой расположен зонд.

Вернемся к задаче морской геоэлектрики. Рассмотрим трехслойную геоэлектрическую модель среды с двумя плоскопараллельными границами. Верхний слой непроводящий. Средний слой — сильно проводящая 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 $Z=0$, а между вторым и третьим $Z=h$. Верхнюю и нижнюю границы будем считать настолько удаленными, что они не влияют на вычисляемые поля.

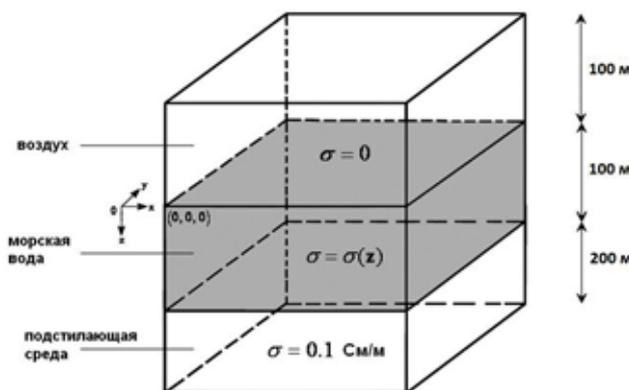


Рис. 1. Геоэлектрическая модель среды

Воспользовавшись аналогией с задачей каротажа и методом получения приближенного выражения (1), можно записать выражение для расчета ЭДС ξ на поверхности слоя горизонтально-однородной морской воды, подстилаемого проводящим полупространством:

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

Взяв натуральный логарифм от выражения (7), получим:

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

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

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

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

Как уже было показано выше, эта величина может быть преобразована в разность фаз. Итак, задавая необходимый разнос в установке и вычисляя разность фаз между измерительными электродами, можно уменьшить влияние слоя морской воды.

Однако данный подход не учитывает одну уникальную особенность слоя морской воды, а именно неоднородность его физических свойств, таких как соленость и температура [3]. При измерении температуры морской воды на разных глубинах водную толщу условно разделяют на три зоны (рис. 2, слева): поверхностная, слой с температурным скачком — термоклин и глубоководная. 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.

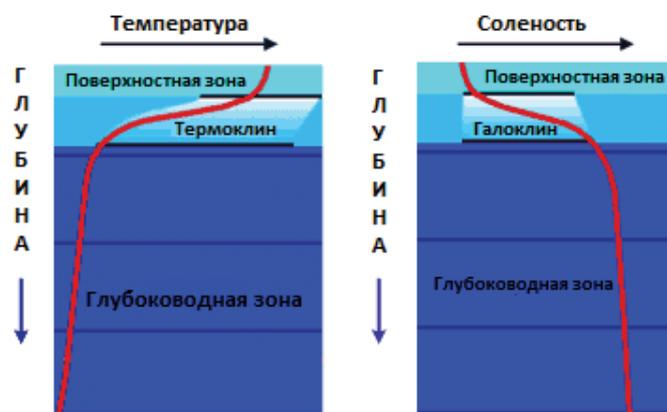


Рис. 2. Изменения температуры и солености воды от глубины

При измерении солености на разных глубинах, толщу морской воды также можно разделить на три зоны (рис. 2, справа) — поверхностная, слой со скачком солености — галоклин и глубоководная. Причем в одном и том же море в разных местах толщина этих слоев для температуры и солености могут быть разными. Вычисления УЭП морской воды на различных глубинах через ее соленость и температуру выполняют с помощью специальных таблиц [4]. Реальные эксперименты показывают, что обобщенное для больших глубин описание изменения температуры и солености морской воды от глубины с помощью линейных функций не всегда корректно. Если для электромагнитных зондирований используются источники с ненулевой вертикальной компонентой электрического поля, то в слое морской воды образуется объемный заряд [5]. В том

случае, если УЭП морской воды задается в виде константы, результаты численных измерений могут оказаться далеки от реальности [5]. Таким образом, при моделировании нельзя не уделять внимание градиентной УЭП морской воды. Очевидно, что эта особенность морской воды как-то повлияет на измеряемую разность фаз, однако сложно сразу сказать, как именно. Это может быть и усиление влияние слоя морской воды, что, в свою очередь, ухудшит реакцию установки на объект.

Проведем небольшой сравнительный анализ моделей установок в морской геоэлектрике. Нас будут интересовать модификации частотных электромагнитных зондирований. В этом случае во всех источниках течет сторонний переменный электрический ток, плотность которого изменяется по гармоническому закону. В качестве источников электромагнитного поля в морской электроразведке могут использоваться либо замкнутые контуры с током, либо отрезки электрических кабелей с токовыми электродами или тороидальными катушками. 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 удалении от них [6]. 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 [7]). Для упрощения расчетов источники часто аппроксимируются вертикальными и горизонтальными магнитными и электрическими дипольными источниками. Следует заметить, что они далеко не всегда удовлетворительно описывают реальные ситуации. Дипольное приближение считается корректным, если расстояние до приемников велико по сравнению с характерными размерами источника [8]. В работе [9] сделана попытка оценить неточности результатов моделирования, связанные с заменой токового кабеля горизонтальным электрическим диполем. Важным вопросом при сравнительном анализе установок является выбор формы сторонних токов — прямоугольных или синусоидальных. В работе [10] сделана попытка численного сравнения разной формы сторонних токов при поиске нефтегазовых залежей на мелководье. Прямоугольные импульсы имеют преимущество, связанное с тем, что в нижнее полупространство направляется максимум энергии, поскольку значения тока находятся на пике амплитуды все время работы установки [11]. Вместе с тем технически невозможно в реальных условиях мгновенно переключать ток с положительного на отрицательное значение, на что 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, как, например, система с источником в виде вертикальной электрической линии [12]. При всей привлекательности такой установки, она имеет один крупный недостаток — при реальных зондированиях практически невозможно удержать токовую линию строго вертикально. Даже при

ее небольших отклонениях от вертикали в среде появляются горизонтальные компоненты электрического поля, тесно связанные с УЭП и толщиной слоя морской воды. На практике наибольшее распространение получила установка, в которой источником выступает изолированный токовый кабель, а в качестве измерительной части — электроды. Такой источник возбуждает в среде, в том числе и под морским дном, как вертикальную, так и горизонтальные компоненты электрических токов. Это создает предпосылки для увеличения пространственного разрешения при выявлении неоднородностей в среде. В данной работе также будет использована данная, хорошо зарекомендовавшая себя, установка. Ее размеры и разнос между источником и приемниками будут определяться в соответствии с подходом, предполагающим уменьшение влияния слоя морской воды, который был описан выше.

Важной характеристикой любой установки является диапазон операционных частот. Их значения, во многом, определяются отношением толщины слоя морской воды к толщине скин-слоя в ней. Исходя из этой оценки, частотный диапазон 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 [13]. Менее жесткие ограничения накладываются на величину питающего тока, который может изменяться от первых десятков до нескольких сотен и даже тысяч ампер.

Выбрав тип установки, нужно определиться с математическим аппаратом, используемым для проведения вычислений. В данной работе используется трехмерный векторный метод конечных элементов в естественных переменных, который позволяет получать все три 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 [14]:

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

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad \text{(закон Гаусса)}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{(закон Гаусса для магнитного поля)}$$

где \vec{J} — плотность объемного тока (A/m^2); \vec{j}^e — плотность стороннего тока (A/m^2); ρ — плотность электрических зарядов ($Kл/m^3$).

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

\vec{E} — напряженность электрического поля (B/m); \vec{D} — электрическое смещение (индукция) ($Kл/m^3$); \vec{H} — напряженность магнитного поля (A/m); \vec{B} — магнитная индукция ($Tл$).

Четыре уравнения Максвелла (10) дополняются тремя уравнениями, характери-

зующими свойства среды и устанавливающими связи между \vec{D} и \vec{E} , \vec{B} и \vec{H} , \vec{J} и \vec{E} :

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

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

Сначала будем рассматривать простейший вариант, при котором все характеристики сред могут быть представлены в виде констант, то есть $\sigma = const$, $\varepsilon = const$, $\mu = const$.

Чтобы решать задачи относительно одного поля (электрического или магнитного) переходят к уравнениям второго порядка [15].

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

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

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

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

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

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

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

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

где $k^2 = \omega^2 \varepsilon - i\omega \sigma$ — волновое число. Для непроводящих сред, когда $\sigma = 0$, эта величина является вещественной.

В общем случае область моделирования состоит из подобластей с различными электромагнитными свойствами материалов. Рассмотрим условия непрерывности электрического поля \vec{E} на границах $\Gamma_{i,j}$, разделяющих подобласти с различными физическими свойствами. Тогда $\Omega = \bigcup_i \Omega_i$, где каждая Ω_i характеризуется своими значениями

ε_i , μ_i , σ_i и условия непрерывности электрического поля могут быть представлены следующим образом:

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

Для корректной формулировки задач моделирования электрического поля, урав-

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

В качестве конечных элементов были выбраны тетраэдры, поскольку их геометрическая форма позволяет задавать объекты высокой степени сложности (например, антиклинальные ловушки). На ячейках тетраэдральной сетки определяются базисные edge-функции, ассоциированные с ребрами сетки конечномерного подпространства $\mathbb{H}^h(\text{rot}; \Omega) \subset \mathbb{H}(\text{rot}; \Omega)$ [16]. В том случае, когда $\sigma \neq \text{const}$ (морская вода), функция электропроводности участвует в построении базисных edge-функций, о чем подробнее описано в работе [5].

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

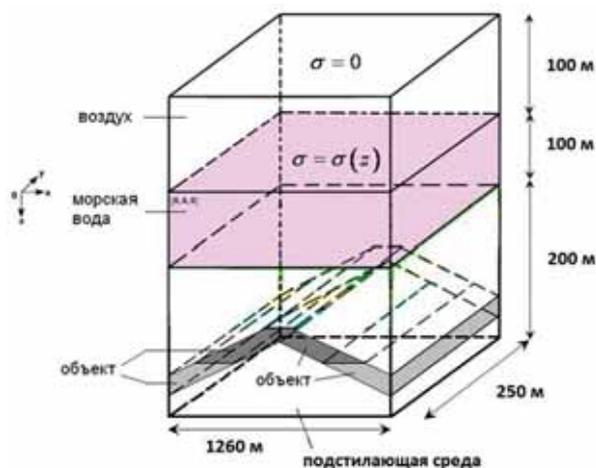


Рис. 3. Модель задачи и расчетная область

Подстилающая среда имеет электропроводность 0.1 См/м. Объект представляет собой антиклинальную ловушку, заглубленную на 50 м от границы «вода — подстилающая среда», протяженностью 330 м и имеющую форму купола или арки (рис. 4).

Такое подробное описание модели антиклинальной ловушки, учитывающее глинистые флюидоупоры, связано с тем, что, на наш взгляд, глинистые флюидоупоры 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 является достаточно сильно электропроводящим. Причем, чем ниже его проницаемость, тем меньшими значениями УЭП он характеризуется. Опесчанивание флюидоупора с повышением его проницаемости выражается в понижении его УЭП.

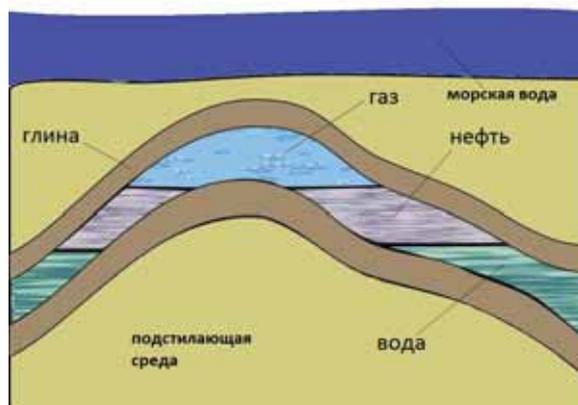


Рис. 4. Модель антиклинальной ловушки

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 электрическое сопротивление может варьироваться [17] в промежутке от 2 до 6 Ом·м, у нефтенасыщенного — от 4 до 50 Ом·м, у газонасыщенного — от 30 до 200 Ом·м и, наконец, у глинистых флюидоупоров — от 2 до 6 Ом·м. В нашем случае будем задавать следующие значения:

водонасыщенный коллектор — 4 Ом·м, глубина — 50 м;

нефтенасыщенный коллектор — 40 Ом·м, глубина — 40 м;

газонасыщенный коллектор — 100 Ом·м, глубина — 30 м;

глинистые пласты — в зависимости от того, с какой средой происходит контакт (при контакте с газом — 3 Ом·м; с нефтью — 3.5 Ом·м; с водой — 4 Ом·м).

Ширина коллекторов составляет от 30 до 100 м (у газонасыщенного коллектора), толщина глинистых пластов — 20 м.

Электропроводность воды — линейная функция (5 См/м вблизи поверхности воды, 7 См/м у дна).



Рис. 5. Модель установки

В качестве приповерхностной геоэлектрической установки, как уже упоминалось выше, выступает изолированный кабель с двумя приемниками, расположенными по одну сторону от источника (рис. 5). Длина изолированного кабеля с током составляет 500 м.

Подобные параметры установки позволяют применять ранее описанный подход

для уменьшения влияния слоя морской воды в модели, изображенной на рис. 3.

Для упрощения моделируемой области, движению будет подвергаться не установка, а объект, что, с вычислительной точки зрения, является по сути тем же самым, что и перемещение установки. Количество точек измерений составляет 91 положение установки над объектом (шаг 10 м).

В качестве измеряемого параметра будет следующим образом вычисляться уже известная нам величина

$$\begin{aligned} & \left| \ln(\xi(k_1, k_2, h, L_1)) \right| - \left| \ln(\xi(k_1, k_2, h, L_2)) \right| \quad \text{в градусах:} \\ & - \left| \ln(\xi(k_1, k_2, h, L_1)) \right| - \left| \ln(\xi(k_1, k_2, h, L_2)) \right|, \text{ если } \left| \ln(\xi(k_1, k_2, h, L_1)) \right| > \left| \ln(\xi(k_1, k_2, h, L_2)) \right|; \\ & + \left| \ln(\xi(k_1, k_2, h, L_1)) \right| - \left| \ln(\xi(k_1, k_2, h, L_2)) \right|, \text{ если } \left| \ln(\xi(k_1, k_2, h, L_1)) \right| < \left| \ln(\xi(k_1, k_2, h, L_2)) \right|. \end{aligned}$$

Такой вид позволяет улучшить отображение измеренной величины на графике.

Целью первой серии экспериментов было приблизительное нахождение эффективной частоты, для чего проводилось тестирование на 3 Гц и выше с удвоением последующей частоты. Поскольку погрешность измерения разности фаз у приборов в полевых условиях колеблется в районе 1 градуса, эффективными можно считать те частоты, на которых реакция на объект составляет 3 и более градусов. В ходе численного моделирования были получены следующие результаты (рис. 6–8).

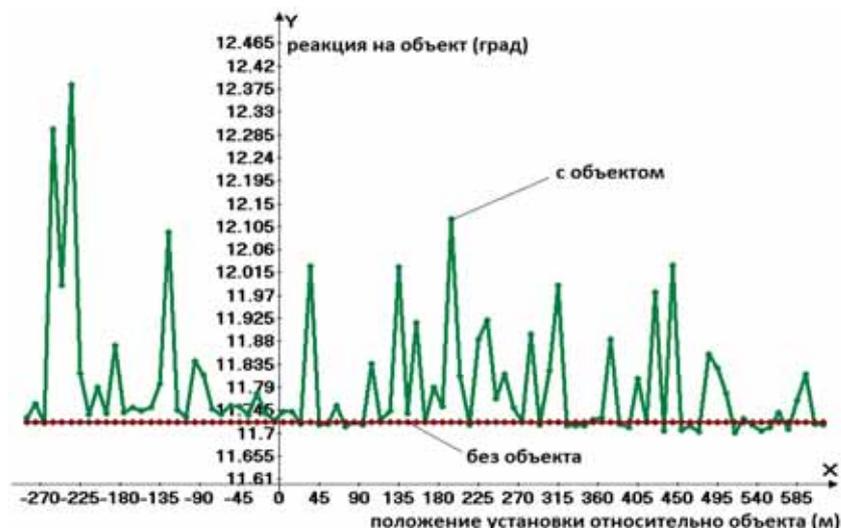


Рис. 6. Реакция на антиклинальную ловушку на частоте 3 Гц. Ось X — положение центра изолированного кабеля относительно центра антиклинальной ловушки (в метрах), ось Y — значение измеряемой величины в градусах. Красная линия — без объекта, зеленая линия — с объектом

Первоначальный поиск эффективной частоты показал, что работа установки на низких частотах — 3 Гц и 6 Гц оказалась менее эффективной, чем на 12 Гц. Если на 12 Гц мы наблюдаем реакцию на объект почти 4 градуса, то для частот 3 Гц и 6 Гц она составляет менее 1 градуса (0.7–0.75 градусов). Точки экстремумов возникают при прохождении краев кабеля и измерительных электродов над областями ВНК — водонефтяного контакта, ГНК — газонефтяного контакта, контактов нефти, газа и воды с глинистыми

флюидоупорами и над верхушкой антиклинальной ловушки (самая близкая к поверхности часть ловушки).

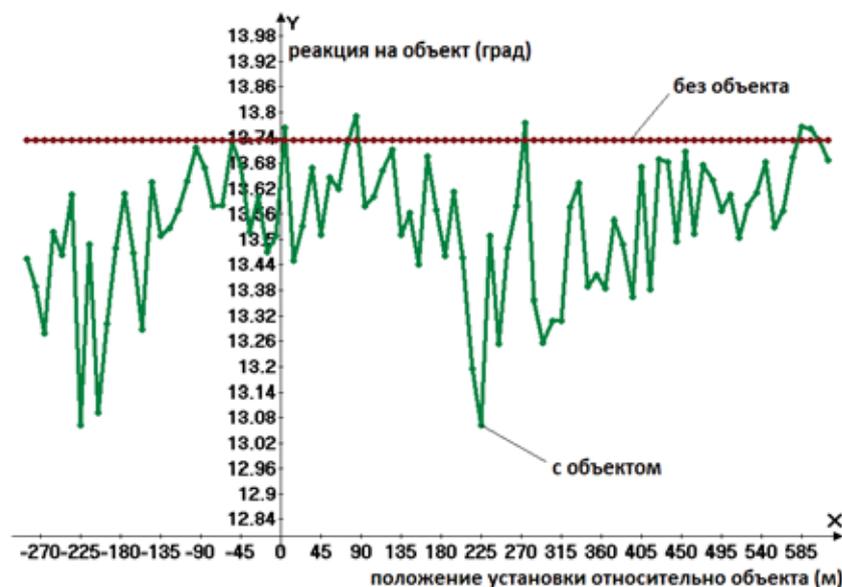


Рис. 7. Реакция на антиклинальную ловушку на частоте 6 Гц. Ось X — положение центра изолированного кабеля относительно центра антиклинальной ловушки (в метрах), ось Y — значение измеряемой величины в градусах. Красная линия — без объекта, зеленая линия — с объектом

Так как этих точек достаточно много, количество скачков на графике также велико. Однако выраженность экстремумов оказывается разной.

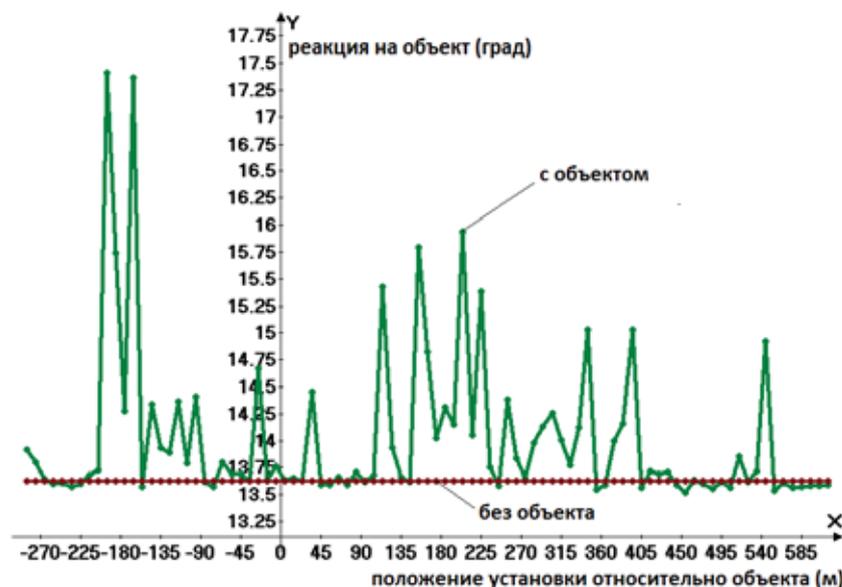


Рис. 8. Реакция на антиклинальную ловушку на частоте 12 Гц. Ось X — положение центра изолированного кабеля относительно центра антиклинальной ловушки (в метрах), ось Y — значение измеряемой величины в градусах. Красная линия — без объекта, зеленая линия — с объектом

Для некоторых частот максимальной оказывается реакция на области ВНК, в то время как для других частот наблюдается более выраженная реакция на области ГНК,

области контактов нефти, газа и воды с глинистыми флюидоупорами или на вершушку антиклинальной ловушки. Очевидно, что это связано с разной глубиной метода на разных частотах.

Несмотря на то, что частота 12 Гц дает вполне достаточную для полевых условий реакцию на объект (почти 4 градуса), были проведены численные эксперименты для проверки эффективности частот, близких к 12 Гц с шагом 1 Гц. В результате было выяснено, что для частоты 11 Гц максимальная реакция на объект составляет также около 4 градусов, но при большем количестве точек с такой реакцией, для 10 Гц — чуть более 2 градусов, а для 13 Гц — почти 5 градусов, но лишь при одном положении установки над антиклинальной ловушкой

Таким образом, диапазон частот от 11 до 13 Гц можно считать эффективным. Вообще, важность точной настройки рабочей частоты объясняется тем, что работа идет на достаточно низких частотах. Глубина проникновения поля (скин-слоя) для однородной среды может быть рассчитана по формуле [18]:

$$\delta = \left(\frac{2}{\omega \mu \sigma} \right)^{\frac{1}{2}} = 503 (f \sigma)^{-\frac{1}{2}} = 503 \sqrt{\rho T}$$

В соответствии с данной формулой можно построить график зависимостей глубины скин-слоя от электрического сопротивления и частоты (рис. 9).

В нашем случае данные зависимости отличаются, поскольку в численной модели участвуют несколько сред с разными характеристиками, одна из которых является градиентной (морская вода). Однако общая картина ясна — чем ниже рабочие частоты, тем более точной настройки требуют приборы.

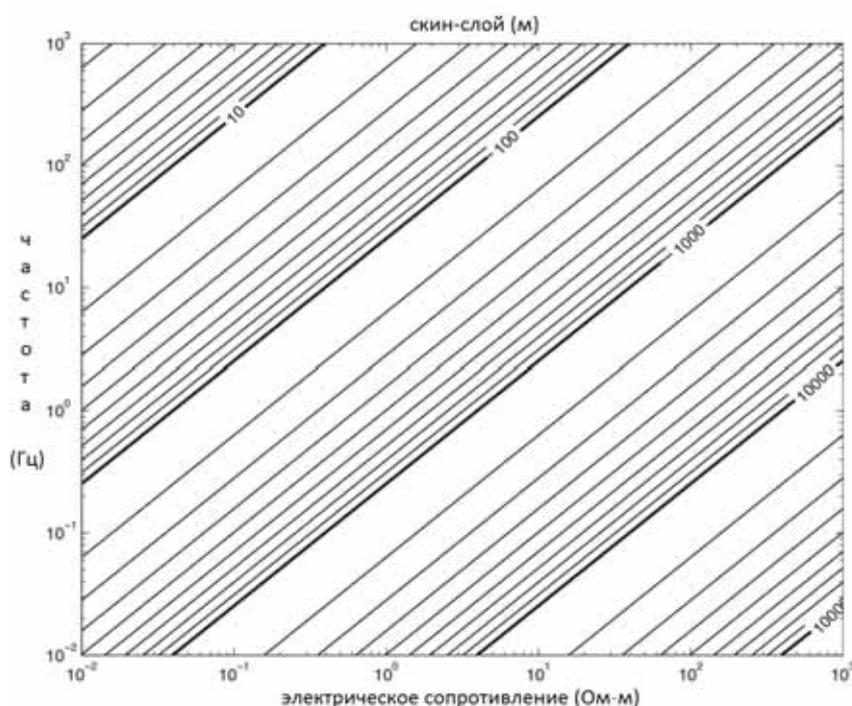


Рис. 9. Зависимость глубины скин-слоя (м) от электрического сопротивления (Ом·м) и частоты (Гц) для однородной среды

Кроме того, было произведено тестирование влияния градиентной электропроводности морской воды на конечный результат. В том случае, если градиент электропроводности не учитывался, точки наибольшей реакции на объект наблюдались при другом положении установки над антиклинальной ловушкой, однако величина реакции оставалась приблизительно такой же. Отсюда можно сделать вывод, что в случае невозможности определения точного значения градиента электропроводности морской воды, данный параметр можно задавать приближенно. Это позволит найти эффективную частоту, но не позволит определить необходимое положение установки над антиклинальной ловушкой и, как следствие, восстановить характер антиклинальной ловушки по полученным измерениям.

Итак, подведем краткие итоги. В данной работе, нам удалось перенести известный в скважинной геофизике подход в область морской геоэлектрической разведки. 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. Во-вторых, непрерывность проводимых измерений, поскольку необходимая реакция на антиклинальную ловушку может оказаться лишь при определенном положении установки над антиклинальной ловушкой. Эта особенность является проблемой лишь при построении численных моделей, поскольку требует дополнительных вычислительных затрат (чем больше точек в модели, тем выше сложность). И, наконец, в-третьих, 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.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №13-05-12031-офи_м.

Список литературы:

1. Davydycheva S., Rykhlini N. Focused-source electromagnetic survey versus standard CSEM: 3D modeling in complex geometries // *Geophysics*, Vol. 76, No. 1, 2011, P. F27–F41.
2. Эпов М.И., Антонов Ю.Н. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство // Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, Издательство СО РАН, 2000, 122 с.

3. Edelson da Cruz Luz, Cicero Roberto Teixeira Regis. Influence of sea water resistivity on MCSEM data // *Rev. Bras. Geof.*, Vol. 27, No. 3, 2009, P. 349–356.
4. Unesco. Background papers and supporting data on the Practical Salinity Scale 1978 // *Unesco Technical Papers in Marine Science*, No. 37. Paris, 1981, 145 p.
5. Мариненко А.В., Эпов М.И., Шурина Э.П. Особенности моделирования электромагнитного поля в прибрежных акваториях морей // *Геология и геофизика*, Новосибирск, 2009, Том 50, № 5, С. 619–629.
6. Um E.S., Alumbaugh D.L. On the physics of the marine controlled-source electromagnetic method // *Geophysics*, Vol. 72, No. 2, 2007. P. WA13–WA26.
7. Constable S., Srnka L.J. An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration // *Geophysics*, Vol. 72, No. 2, 2007, P. WA3–WA12.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория поля. — Издание 8-е, стереотипное. — М.: Физматлит, 2006, Том 2, 534 с.
9. Streich R., Becken M. Electromagnetic fields generated by finite-length wire sources: comparison with point dipole solutions // *Geophysical Prospecting*, 59, 2011, P. 361–374.
10. Connell D., Key K. A numerical comparison of time and frequency-domain marine electromagnetic methods for hydrocarbon exploration in shallow water // *Geophysical Prospecting*, 61, 2013, P. 187–199.
11. Rune Mittet, Tor Schaug-Pettersen. Shaping optimal transmitter waveforms for marine CSEM surveys // *SEG/San Antonio Annual Meeting*, 2007, P. 539–543.
12. Louise Pellerin, Gerald W. Hohmann. A parametric study of the vertical electric source // *Geophysics*, Vol. 60, No. 1, 1995, P. 43–52.
13. *Low Level Measurements Handbook*. — 7th edition. / [Страница Keithley A Tektronix Company]. 2013. 245 p.
14. Jackson J. *Classical electrodynamics* // New York, Wiley, 1962, 839 p.
15. 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.
16. Nedelec J.C. Mixed Finite Elements in R^3 // *In: Number. Math.*, Vol. 35, No. 3, 1980, P. 315–341.
17. Епов М.И., Antonov Yu.N., 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.
18. Connell D. A comparison of marine time-domain and frequency-domain controlled source electromagnetic methods // *The Thesis of Dylan Connell, University of California, San Diego*, 2011, 75 p.