

УДК 550.837:517.958

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЙ  
МОРСКОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ГЕОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

**М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, Ю.И. Кошкина**

*Новосибирский государственный технический университет  
persova@fpm.ami.nstu.ru*

Приводятся результаты 3D-моделирования геоэлектромагнитных полей для различных источников электромагнитного поля, применяемых в технологиях морской электроразведки при поисках залежей углеводородов.

*Ключевые слова:* морская электроразведка, метод конечных элементов, гармонический ток, горизонтальная электрическая линия, круговой электрический диполь.

## **1. Введение**

В настоящее время освоение ресурсов Мирового океана является крайне важной и актуальной задачей. Геологоразведочные исследования, основанные на использовании сейсмических методов и наиболее часто используемые на материке, при поиске углеводородов в морских условиях являются чрезвычайно дорогими и проблематичными, поскольку их эффективность существенно зависит от наличия достаточно большого количества скважин.

Для электроразведки при этом геоэлектрические условия морских месторождений углеводородов являются достаточно благоприятными, а использование гальванических источников возбуждения электромагнитного поля не только вполне технологично по причине простого и уверенного заземления на проводящую морскую воду, но и обладает хорошими предпосылками обнаружения слабопроводящих объектов (залежей углеводородов), залегающих в проводящей толще.

В этих условиях чрезвычайно важной становится задача выбора наиболее эффективной технологии в зависимости от условий проведения работ. При этом качественное решение этой задачи проектирования возможно осуществить только с использованием аппарата высокоточного математического моделирования.

В данной работе на основе такого аппарата 3D-моделирования будут проанализированы возможности различных технологий морской электроразведки для нескольких геоэлектрических моделей.

## **2. Математический аппарат**

Для проведения исследований в данной работе было использовано программное обеспечение, разработанное авторами проекта. Математические модели, на которых базируются реализованные в программном обеспечении вычислительные схемы рас-

---

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

чета трехмерных гармонических полей для решения задач электроразведки, основаны на использовании технологии конечноэлементного 3D-моделирования с разделением поля на нормальную составляющую, описывающую поле источника во вмещающей горизонтально-слоистой среде, и аномальную (трехмерную) составляющую, описывающую поле влияния трехмерных объектов [1, 2].

### 3. Результаты численного моделирования

Одной из наиболее известных технологий морской электроразведки в условиях глубокой воды является технология, применяемая фирмой EMGS (Норвегия) и описанная в работах [3–8]. В этих же работах была рассмотрена и типовая геоэлектрическая модель, используемая для описания модели залежи углеводородов в глубоководных морских условиях.

В работе [3] также приведены расчеты для моделей целевых объектов в виде дисков различных размеров, залегающих на глубине от 1000 до 1100 м от морского дна. При этом результаты расчетов приведены без учета влияния воздуха, т. е. в качестве вмещающей среды была взята не трехслойная (где третьим слоем является воздух), а двухслойная модель (морская вода и грунт).

В качестве первого примера рассмотрим именно эту модель, поскольку, во-первых, это позволит провести сравнение с результатами расчетов, полученными другими авторами, а во-вторых, мы хотим оценить влияние воздуха, который не учитывался при расчетах в работе [3].

Итак, вмещающая среда была взята в виде трехслойной модели, параметры которой представлены в таблице.

Характеристики вмещающей среды

| Слои         | $h$ , м  | $\sigma$ , См/м |
|--------------|----------|-----------------|
| Воздух       | $\infty$ | 0               |
| Морская вода | 1000     | 3               |
| Грунт        | $\infty$ | 1               |

Объект, имитирующий залежь углеводородов, был помещен на глубину 1000–1100 м от поверхности дна (и, соответственно, на глубину 2000–2100 м от морской поверхности). Удельная электрическая проводимость объекта была взята равной 0,01 См/м, а размеры объекта в плане варьировались от  $1 \times 1$  км<sup>2</sup> до  $5 \times 5$  км<sup>2</sup> (всего было рассмотрено пять вариантов размеров объекта).

ГЭЛ длиной 300 м была расположена чуть смещенной (на 500 м) относительно проекции левого края объекта на поверхность дна. Приемные линии располагались вдоль профиля, где была расположена ГЭЛ. Частота тока в источнике – 1 Гц.

Рассматриваемая геоэлектрическая модель с источником ГЭЛ (будем называть ее модель 1) приведена в плане и в разрезе на рис. 1 (на рисунке, где модель представлена в плане, сплошной линией показан объект с размерами  $2 \times 2$  км<sup>2</sup>, а пунктирными линиями показаны контуры остальных рассматриваемых объектов).

Наряду с источником ГЭЛ проанализируем возможности, предоставляемые другим источником – источником в виде кругового электрического диполя [9]. Заметим, что принцип этого источника – компенсационный, т. е. он максимально снижает влияние вмещающей среды, позволяя тем самым увеличить аномальный сигнал от поискового

объекта, поэтому при использовании этого источника уровень измеряемого сигнала заведомо ниже. В связи с этим радиус источника в данной ситуации был выбран равным 1000 м.

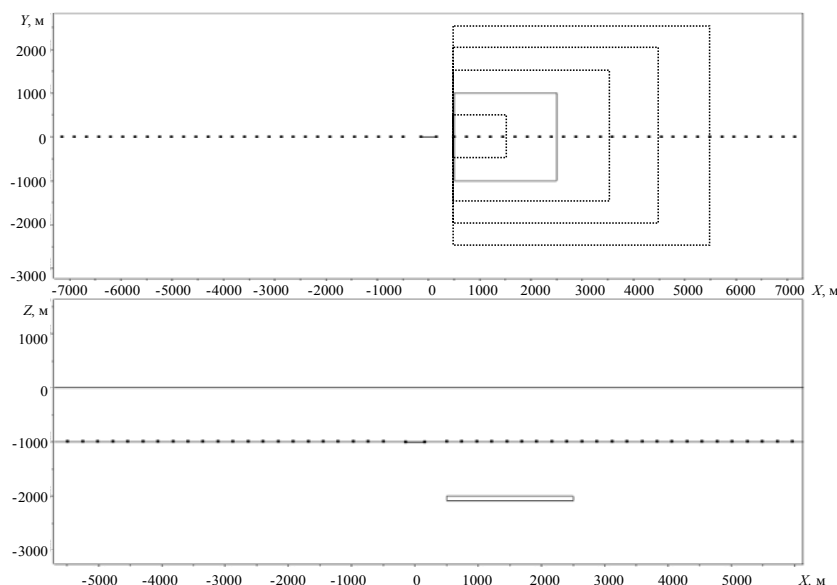


Рис. 1. Геоэлектрическая модель в плане и в разрезе

На рис. 2 приведены графики амплитуды  $x$ -компоненты напряженности электрического поля в точках профиля для различных размеров объекта при возбуждении поля источником ГЭЛ (рис. 2, *a*) и источником КЭД (рис. 2, *б*) (графики не нормированы, сигналы приведены в вольтах, ток в источнике – 1А), индексом «0» обозначена кривая, соответствующая полю вмещающей среды – полю без объекта. Из приведенных на рис. 2, *a* результатов расчета видно, что объект размером  $1 \times 1$  км<sup>2</sup> практически не виден в измеряемом сигнале, остальные же объекты по этим данным могут выделяться достаточно уверенно.

Существенное влияние слоя воздуха в измеряемом сигнале во вмещающей среде наблюдается примерно с 5,2–5,5 км.

Заметим, что полученные результаты хорошо совпадают с результатами расчетов, приведенными в работе [3], за исключением того, что там приведены результаты расчетов без учета воздуха (поэтому графики совпадают примерно до 5,5 км). Обратим внимание, что при сравнении с графиками, приведенными в работе [3], следует учитывать, что там приведены графики для единичного диполя (либо деленные на длину линии) и, возможно, несколько при другом смещении относительно края объекта.

Из приведенных на рис. 2, *б* результатов расчета видно, что наряду с увеличением уровня относительной аномалии (за исключением объектов небольших размеров) абсолютный уровень сигнала заметно снизился: даже по кривой, соответствующей сигналу для модели с объектом размером 5 км, видно, что в районе 5 км уровень сигнала от КЭД на полтора порядка ниже, чем от ГЭЛ (частота тока в источнике была взята 3 Гц – для КЭД эта частота для рассматриваемой геоэлектрической модели дает максимальные относительные отклики от целевого объекта, как для ГЭЛ частота 1 Гц).

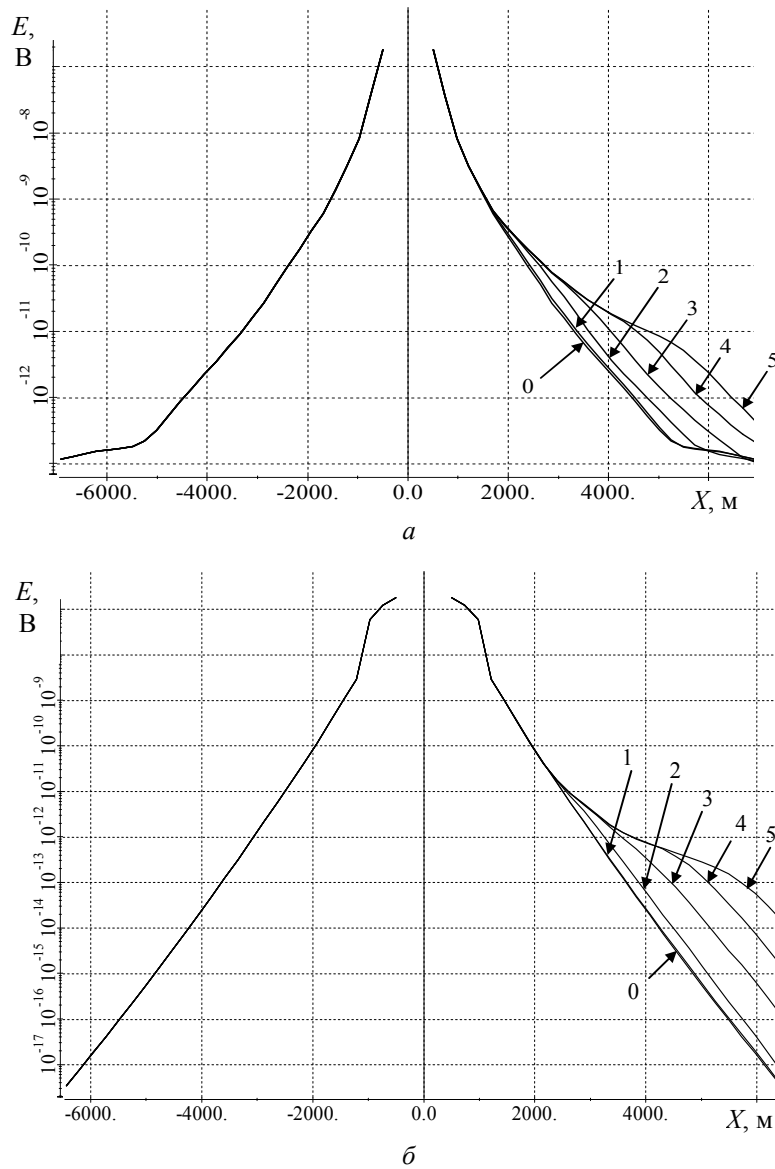


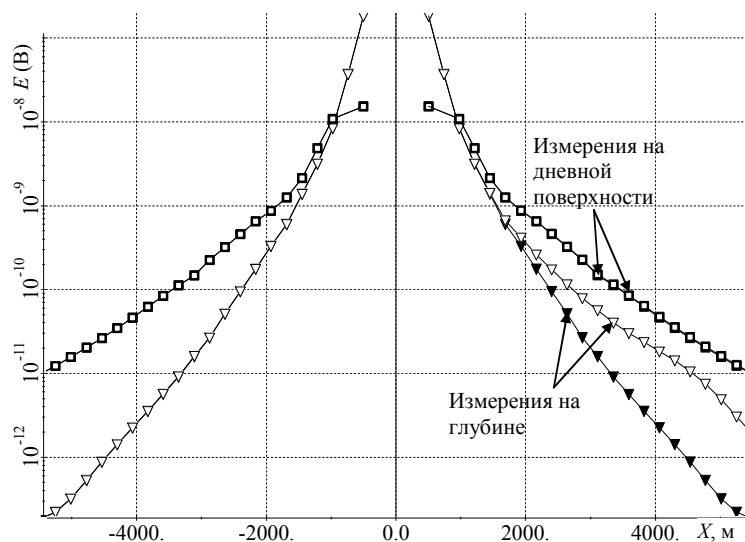
Рис. 2. Графики амплитуды  $x$ -компоненты напряженности электрического поля в точках профиля для различных размеров объекта при возбуждении электромагнитного поля источником в виде ГЭЛ (а) и КЭД (б) (цифрами на рисунке обозначен размер объекта в плане, индексом «0» обозначена кривая, соответствующая полю вмещающей среды)

Учитывая этот факт, для данной технологии проведения работ использование источника в виде КЭД практически не имеет смысла.

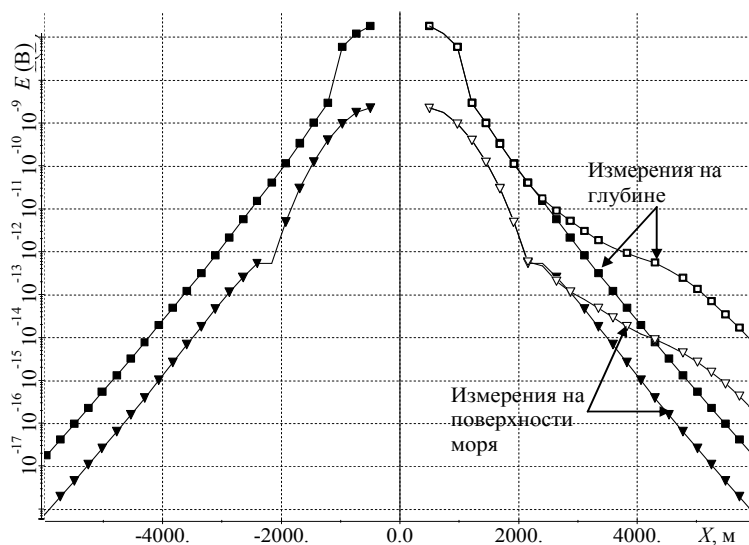
Рассмотрим возможность помещения измерителей на дневную поверхность: при выполнении площадной съемки это может быть гораздо более экономично.

Соответствующие результаты расчетов для нормального поля и поля с объектом размером  $4 \times 4 \text{ м}^2$  приведены на рис. 3. Из приведенных на рис. 3, б результатов рас-

четов видно, что при возбуждении поля с помощью заглубленного КЭД и измерениях на поверхности морской воды относительная аномалия практически не уменьшается, однако при этом сигнал уменьшается еще более существенно и поэтому для таких глубин рассматриваемая технология становится практически малопригодной.



а



б

Рис. 3. Графики амплитуды  $x$ -компоненты напряженности электрического поля в точках профиля для объекта размером  $4 \times 4 \text{ км}^2$  при возбуждении электромагнитного поля источником в виде ГЭЛ (а) и КЭД (б) при расположении приемников на дне и при расположении приемников на поверхности моря (в каждой паре кривых закрашенная кривая соответствует полю вмещающей среды без объекта, а незакрашенная – полю с объектом)

Однако тот факт, что уровень относительной аномалии не падает, создает хорошие предпосылки для осуществления довольно технологичной площадной съемки при измерении на поверхности воды в условиях небольших глубин (эти задачи будут рассмотрены нами чуть ниже).

Что касается ГЭЛ (рис. 3, *а*), то при подъеме приемников вверх (к морской поверхности) уровень относительной аномалии быстро падает и полностью исчезает на поверхности, поэтому для ГЭЛ использовать такую технологию не имеет никакого смысла.

Рассмотрим теперь геоэлектрические модели, в которых мощность морской воды составляет 80 м. На рис. 4 приведены графики расчетов поля ГЭЛ и КЭД для геоэлектрической модели с объектом  $2 \times 2 \text{ км}^2$  при глубокой (толщина слоя морской воды равна 1000 м) и мелкой (толщина слоя морской воды равна 80 м) воде.

Из приведенных на рис. 4, *а* результатов расчетов видно, что уровень относительной аномалии в условиях мелкой воды для ГЭЛ достаточно существенно уменьшился и для частоты 1 Гц – он составляет порядка 30 % (вместо 120 % для глубокого моря). При уменьшении частоты аномалию удастся увеличить лишь до 40 %.

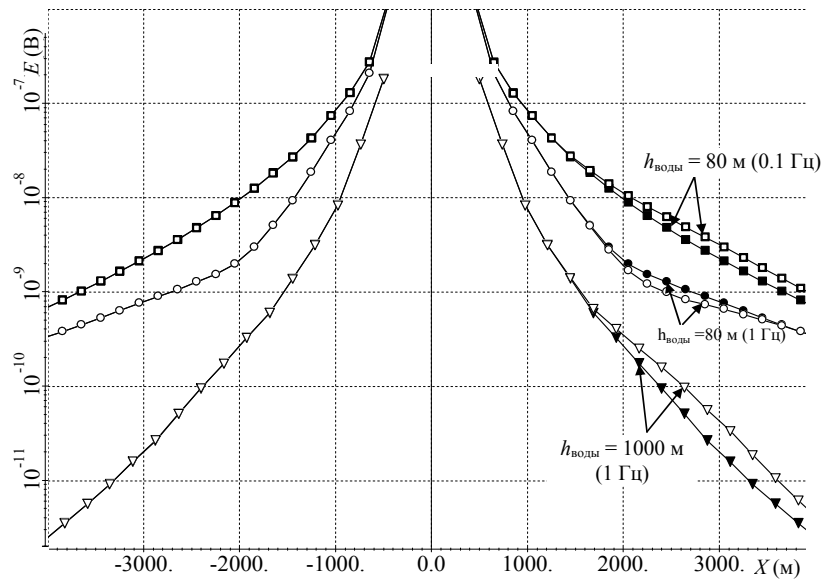
Для источника же типа КЭД (рис. 4, *б*) аномалия от рассматриваемого объекта не только не уменьшилась, а даже наоборот, достаточно серьезно увеличилась (вместо 160 % аномалия стала порядка 250 %). Кроме того, что также является важным, – достаточно существенно увеличился уровень сигнала, и при этом расположение приемников поля на дне или на поверхности моря практически не влияет ни на уровень сигнала, ни на уровень относительной аномалии.

Таким образом, с уменьшением толщины слоя морской воды технологии электроразведки с использованием КЭД начинают приобретать значимые преимущества за счет существенно более высокой относительной аномалии, возможности проведения технологичных площадных съемок по поверхности воды без установки донных станций, а также достаточного уровня измеряемого сигнала.

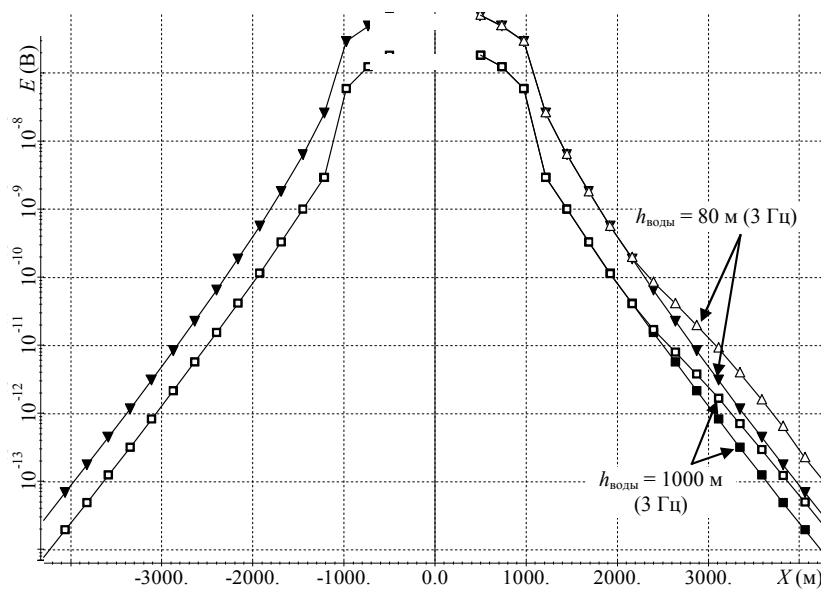
Однако существенной проблемой остается поиск объектов малых размеров. И здесь можно рассмотреть возможности использования нестационарных полей.

В работе [1] было показано, что измерения нестационарного поля ГЭЛ не позволяют выделять отличные по сопротивлению от вмещающей среды целевые объекты даже на относительно небольших глубинах. В области поздних времен графики для моделей с неоднородностями «выходят» на график вмещающей среды, что, в принципе, может быть использовано как благоприятный фактор при определении ее характеристик.

Для получения же выделяемых откликов от глубинного объекта малых размеров требуется изучение нестационарных полей источников в виде КЭД и ВЭЛ. При этом измерения поля (в отличие от гармонического режима) нужно проводить в непосредственной близости от оси этих источников – для получения высокого уровня аномального сигнала разность должна составлять порядка 100 м. На рис. 5 показано расположение источника, точек измерения и проекция целевого объекта с размерами  $1 \times 1 \text{ км}^2$  на плоскость, где расположен источник КЭД (объект по-прежнему расположен на глубине от 1000 до 1100 м от морского дна).



а



б

Рис. 4. Графики амплитуды  $x$ -компоненты напряженности электрического поля в точках профиля для объекта с размером  $2 \times 2 \text{ км}^2$  при возбуждении электромагнитного поля источником в виде ГЭЛ (а) и КЭД (б) для моделей глубокой (1000 м) и мелкой (80 м) воды (в каждой паре кривых закрашенная кривая соответствует полю вмещающей среды без объекта, а незакрашенная – полю с объектом)

Результаты расчета нестационарного поля (измеренного в приемнике после выключения тока в источнике) для этой модели в виде амплитуды  $r$ -компоненты напряженности электрического поля приведены на рис. 6. Индексом «0» на рис. 6 обозна-

чен график нормального поля, индексом «1» – график для модели с объектом в точке справа (смещенной по  $X$ ), индексом «2» – в точке слева (смещенной по  $X$ ), индексом «3» – в точке сверху (смещенной по  $Y$ ). Из приведенных результатов расчета видно, что уровень относительной аномалии достаточно большой, что, в свою очередь, дает возможность довольно уверенного выделения этого объекта.

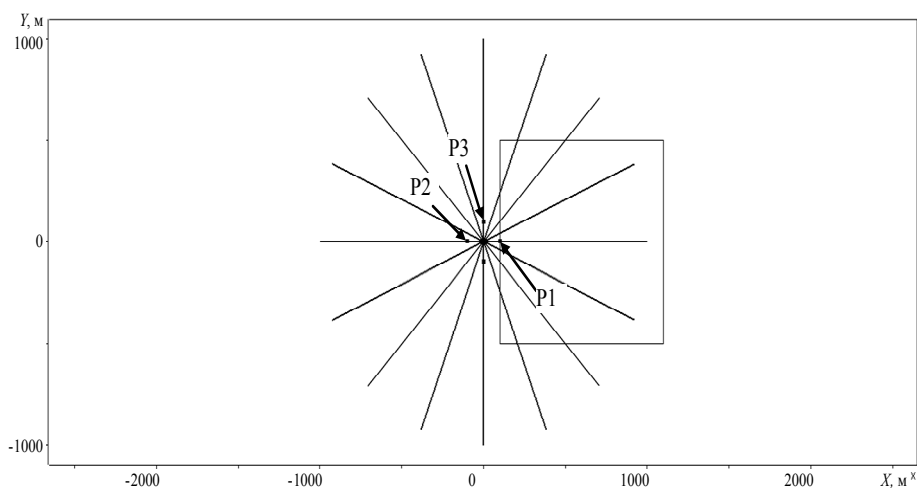


Рис. 5. Расположение источника, точек измерения и проекция целевого объекта

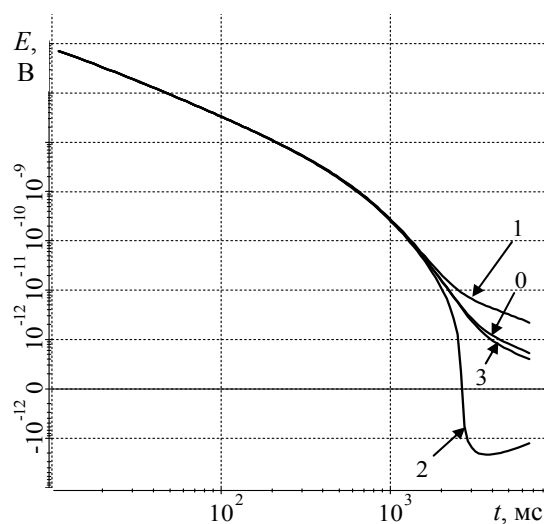


Рис. 6. Графики амплитуды  $r$ -компоненты напряженности электрического поля для объекта с размером  $1 \times 1 \text{ км}^2$  при изучении процесса становления поля от источника в виде КЭД (цифрами на рисунке обозначены точки измерения в соответствии с рис. 5)



Однако, при наличии такой чувствительности к маленьким и очень далеким объектам логично предположить, что все неоднородности будут так или иначе влиять на получаемый сигнал.

#### 4. Заключение

На основе результатов, полученных с использованием 3D-моделирования, были проанализированы возможности электроразведочных технологий с источниками в виде ГЭЛ и КЭД при их работе в частотном и временном режимах и измерении горизонтальной компоненты электрического поля с использованием донных станций (на морском дне) и при перемещении их по поверхности моря. Результаты расчетов показали, что начиная с некоторого размера целевых объектов для условий глубокой воды наиболее эффективной является технология, использующая в качестве источника возбуждения горизонтальную электрическую линию в частотном режиме. Для условий мелкой воды более эффективна технология, использующая в качестве источника возбуждения КЭД. Обнаружение же объектов малых размеров на больших глубинах возможно только с использованием нестационарных полей, возбуждаемых КЭД (или его аналогом ВЭЛ).

В целом выполненные расчеты и полученные результаты показывают, что наиболее эффективной может быть комплексная технология, сочетающая в себе преимущества нескольких источников электромагнитного поля – ГЭЛ, ВЭЛ и КЭД. При этом разработка такой технологии и дальнейшее ее применение возможно только с привлечением аппарата высокоточного 3D-моделирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Персова М.Г.** Компьютерное моделирование геоэлектромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Г.М. Тригубович // *Физика Земли*, 2011. – № 2. – С. 3–14.
- [2] **Соловейчик Ю.Г.** Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач / Ю.Г. Соловейчик, М.Э. Рояк, М.Г. Персова. – Новосибирск: НГТУ, 2007. – 896 с.
- [3] **Constable S.** Marine electromagnetic methods – A new tool for offshore exploration. *THE LEADING EDGE*. APRIL, 2006. – P. 438–444;
- [4] **Constable, S. and C.J. Weiss**, 2006, Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods: Insights from 1D modeling // *Geophysics*, 71, № 2, G43–G51;
- [5] **Constable S.** Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration / S. Constable // *Geophysics*, Vol. 75, № 5, 2010; P. 75A67–75A81;
- [6] **Myer David, Steven Constable, Kerry Key, Michael E. Glinisky, and Guimin Liu.** Marine CSEM of the Scarborough gas field, Part 1: Experimental design and data uncertainty // *Geophysics*. – Vol. 77. – № 4. – 2012. – P. E281–E299;
- [7] **Orange Arnold, Kerry Key, and Steven Constable.** The feasibility of reservoir monitoring using time-lapse marine CSEM // *Geophysics*, V. 74, NO. 2, 2009; P. F21–F29;
- [8] **Weitemeyer Karen, Guozhong Gao, Steven Constable and David Alumbaugh.** The practical application of 2D inversion to marine controlled-source electromagnetic data // *Geophysics*. – Vol. 75. – № 6. – 2010. – P. F199–F211.
- [9] **Могилатов В.С.** Круговой электрический диполь новый источник для электроразведки / В.С. Могилатов // *Изв. РАН. Сер. Физика Земли*. – 1992. – № 6. – С. 97–105;

*M.G. Persova, Yu.G. Soloveychik, D.V. Vagin, Yu.I. Koshkina*

**ANALYSIS OF CAPABILITIES OF MARINE ELECTRICAL PROSPECTING TECHNOLOGIES USING SOFTWARE FOR 3D-MODELING OF GEOELECTRIC FIELDS**

The results of 3D-modeling of geoelectric fields for different sources of electromagnetic field employed in marine electrical prospecting technologies for the hydrocarbon deposit survey are presented

*Keywords:* Marine electrical prospecting; Finite element method; Harmonic current; Horizontal electrical line; Circle electric dipole.

*Статья поступила 11 октября 2012 г.*