

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. В. Мариненко, М. И. Эпов, В. В. Оленченко, Решение прямых задач электро-
томографии для сред с высокопроводящими неоднородностями сложной формы
на примере кустовой площадки месторождения, *Сиб. журн. индустр. матем.*,
2019, том 22, номер 1, 63–73

DOI: <https://doi.org/10.33048/sibjim.2019.22.107>

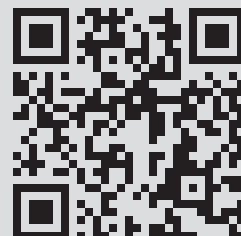
Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и
согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 194.247.184.9

17 июля 2020 г., 12:58:06



РЕШЕНИЕ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ СРЕД С ВЫСОКОПРОВОДЯЩИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА ПРИМЕРЕ КУСТОВОЙ ПЛОЩАДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А. В. Мариненко, М. И. Эпов, В. В. Оленченко

Рассматривается кустовая площадка месторождения, на которой в качестве помех выступают металлические трубы разного диаметра, находящиеся над и под землей, а также скважины с металлической обсадкой. Искомыми объектами исследования являются зоны растепления, расположенные вблизи скважин. Численные расчеты прямых задач выполнялись узловым методом конечных элементов, реализованном в авторском программном комплексе для решения задач электротомографии.

Ключевые слова: прямые задачи, электротомография, метод конечных элементов, аномалии.

DOI 10.33048/SIBJIM.2019.22.107

Введение. Для геофизических исследований методом электротомографии на постоянном токе часто возникает необходимость проведения предварительного численного моделирования. Особенно это актуально в том случае, когда имеется некоторая информация о подвергаемых томографии породах. Например, такая информация есть на геофизических площадках, где проводится бурение скважин. Существующее электротомографическое программное обеспечение позволяет проводить прямое моделирование лишь в простейших случаях и решает прежде всего задачу определения числа и разности между электродами на площадке для успешного обнаружения объекта, залегающего на некоторой глубине. Целью данной работы являлось создание подхода, который позволит изучить влияние объектов, содержащихся в слое земли и над ним, на результирующую картину кажущихся сопротивлений, а также выработать стратегию минимизации этого влияния. Подобная проблема возникает в случае тех же скважин с металлической обсадкой, наличие которых сильно затрудняет решение задачи инверсии [1].

1. Модель среды и выбор рабочей установки. Рассмотрим в качестве примера электротомографию на кустовых площадках с эксплуатационными газовыми скважинами [1]. Цель электротомографии заключалась в выделении возможной низкоомной зоны растепления многолетнемерзлых пород вокруг основного ствола скважины. На площадке в большом количестве присутствуют надземные и подземные металлические конструкции: трубы, сваи, обсадные колонны. Модель типичной площадки, основных металлических конструкций и положение возможных относительно низкоомных зон растепления показана на рис. 1.

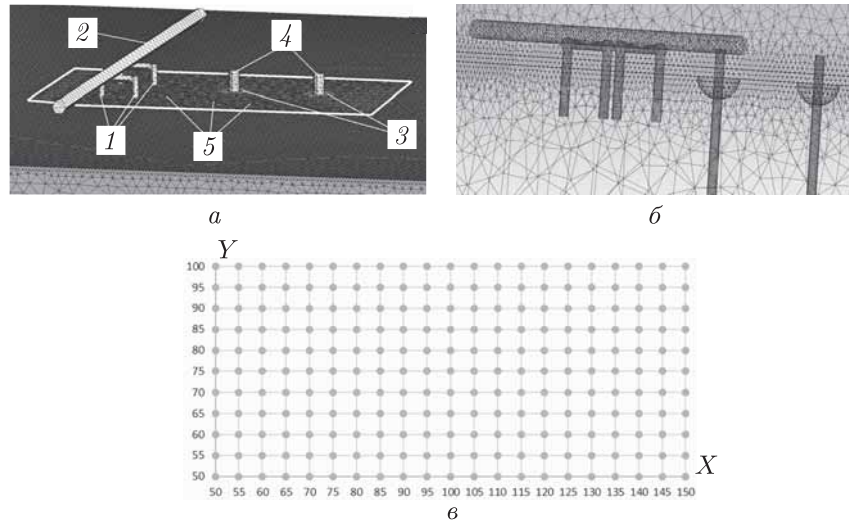


Рис. 1. Модель типичной площадки и площадной системы возбуждения-измерения:
 а — модель кустовой площадки с двумя скважинами;
 б — пример тетраэдрального разбиения области моделирования в районе металлических конструкций;
 в — равномерная площадная система возбуждения-измерения

На рис. 1, а использованы следующие обозначения: 1 — металлические опоры, вбитые в землю; 2 — металлическая труба, расположенная на опорах; 3 — зоны растепления вблизи скважин; 4 — скважины с металлической обсадкой; 5 — область, где проводятся электротомографические исследования.

При проектировании работ по электротомографии сначала выбирается тип зондирующей установки. Наиболее распространенной является установка Веннера-альфа [2]. Она состоит из четырех равноудаленных электродов: двух питающих, расположенных в точках A и B , и двух измерительных, расположенных в точках M и N (рис. 2).

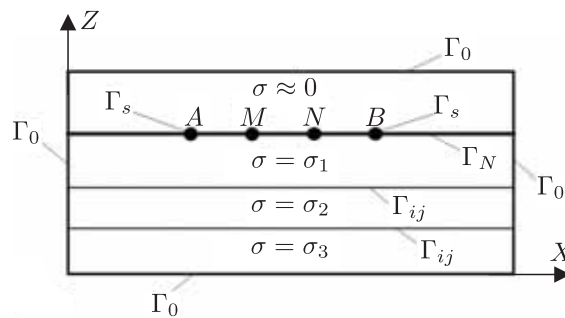


Рис. 2. Сечение XOZ расчетной слоистой области моделирования

2. Математическая модель. На питающих электродах, расположенных в точках A и B установки Веннера-альфа, задается либо постоянная разность потенциалов, либо значение стекающего поверхностного тока. Математические постановки для этих двух случаев несколько различаются между собой. Сначала рассмотрим первый тип возбуждения. Определим напряженность электрического поля в среде при заданной постоянной разности потенциалов на питающих электродах. Предположим, что верхнее полупространство является

воздухом с электропроводностью, близкой к нулю. Нижнее проводящее полупространство без латеральных неоднородностей будем считать трехслойным. Введем правостороннюю декартову систему координат. Уравнение плоскости $Z = 0$ является дневной поверхностью, ось Z направлена вверх. Каждый из слоев характеризуется значениями удельной электропроводности σ , магнитной μ и диэлектрической ϵ проницаемости. Будем искать значения электрического поля во всех точках слоистой области моделирования (см. рис. 2).

Запишем систему уравнений Максвелла в стационарном режиме [3]:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \vec{J}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0. \quad (4)$$

Здесь $\vec{E}$ — напряженность электрического поля (В/м); $\vec{D}$ — электрическая индукция (Кл/м³); $\vec{H}$ — напряженность магнитного поля (А/м); $\vec{B}$ — магнитная индукция (Тл); σ — удельная электропроводность (См/м); $\vec{J}$ — плотность стороннего поверхностного тока (А/м²).

Рассмотрим уравнения состояния $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$. В точке B разместим скалярный электрический потенциал φ . Из (1) следует

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi. \quad (5)$$

Область, в которой рассматривается краевая задача, будем обозначать Ω . Она состоит из подобластей Ω_i с разными электрическими свойствами. На границе $\partial\Omega = \Gamma_0$ расчетной области (см. рис. 2) искомые значения близки к нулю. Если среда выше границы земля-воздух Γ_N не содержит проводящих объектов, верхняя граница расчетной области $\partial\Omega$ представляет собой объединение Γ_N и Γ_S . На Γ_N задаются условия непротекания для нормальной компоненты плотности тока:

$$\vec{n} \cdot \vec{J}|_{\Gamma_N} = \vec{n} \cdot \sigma \vec{E}|_{\Gamma_N} = \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{\Gamma_N} = 0,$$

где $\vec{n}$ — единичная внешняя нормаль к границе Γ_N .

На границе электрод-среда Γ_S зададим значение потенциала $\varphi|_{\Gamma_S} = \varphi_0$.

Функция φ_0 на участках границы Γ_S , соответствующих расположению питающих электродов, равна заданной разности потенциалов. Например, при разности потенциалов 2 В функция может быть задана следующим образом:

$$\varphi_0 = \begin{cases} 1 \text{ В} & \text{на } \Gamma_S \text{ в точке } A, \\ -1 \text{ В} & \text{на } \Gamma_S \text{ в точке } B. \end{cases} \quad (6)$$

На границах Γ_{ij} , разделяющих подобласти с разной удельной электропроводностью, задаются условия сопряжения для электрического поля $\vec{E}$:

$$[\vec{n} \times \vec{E}]_{\Gamma_{ij}} = 0, \quad [\vec{n} \cdot \sigma \vec{E}]_{\Gamma_{ij}} = 0.$$

Эти условия определяют непрерывность потенциала φ и его нормальной производной на границах Γ_{ij} :

$$[\varphi]_{\Gamma_{ij}} = 0, \quad \left[\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{\Gamma_{ij}} = 0,$$

где $\vec{n}$ — единичная внешняя нормаль к Γ_{ij} .

Таким образом, можно записать следующую краевую задачу:

$$-\operatorname{div} \sigma \operatorname{grad} \varphi = 0 \quad \text{в} \quad \Omega = \bigcup_i \Omega_i; \quad (7)$$

$$\varphi|_{\Gamma_S} = \varphi_0; \quad (8)$$

$$\varphi|_{\Gamma_0} = 0; \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{\Gamma_N} = 0 \quad (10)$$

(при отсутствии объектов выше границы земля — воздух);

$$[\varphi]_{\Gamma_{ij}} = 0; \quad (11)$$

$$\left[\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{\Gamma_{ij}} = 0. \quad (12)$$

Перейдем ко второй задаче: определить электрическое поле в среде при заданном стекающем токе на питающих электродах. Эта задача отличается от предыдущей тем, что на границе электрод-среда Γ_S задается значение плотности поверхностного тока, стекающего с питающих электродов:

$$\vec{n} \cdot \vec{J}|_{\Gamma_S} = \vec{n} \cdot \sigma \vec{E}|_{\Gamma_S} = \sigma \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{\Gamma_S} = j_S,$$

где $\vec{n}$ — единичная внешняя нормаль к границе Γ_S .

Соответствующая краевая задача имеет следующий вид:

$$-\operatorname{div} \sigma \operatorname{grad} \varphi = 0 \quad \text{в} \quad \Omega = \bigcup_i \Omega_i; \quad (13)$$

$$\left. \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{\Gamma_S} = j_S; \quad (14)$$

$$\varphi|_{\Gamma_0} = 0; \quad (15)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{\Gamma_N} = 0 \quad (16)$$

(при отсутствии объектов выше границы земля-воздух);

$$[\varphi]_{\Gamma_{ij}} = 0; \quad (17)$$

$$\left[\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{\Gamma_{ij}} = 0. \quad (18)$$

Запишем вариационные формулировки для этих краевых задач. Введем следующие пространства:

$$H^1 = \{\varphi \in L^2(\Omega) \mid \operatorname{grad} \varphi \in L^2(\Omega)\},$$

$$H_0^1 = \{\varphi \in H^1(\Omega) \mid \varphi|_{\partial\Omega} = 0\},$$

$$(u, v) = \int_{\Omega} uv \, d\Omega + \int_{\Omega} \operatorname{grad} u \cdot \operatorname{grad} v \, d\Omega,$$

$$\|u\|_{H^1}^2 = \int_{\Omega} u^2 \, d\Omega + \int_{\Omega} (\operatorname{grad} u)^2 \, d\Omega.$$

Для первой из них вариационная формулировка в форме Галеркина имеет вид: найти $\varphi \in H^1(\Omega)$ такое, что $\varphi - \varphi_0 \in H_0^1(\Omega)$ и для любой функции $v \in H_0^1(\Omega)$ выполняется

$$\begin{aligned} - \int_{\Omega} \sigma \operatorname{grad} \varphi \cdot \operatorname{grad} v \, d\Omega + \int_{\Gamma_0} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n_0} v \, d\Gamma \\ + \int_{\Gamma_N} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} v \, d\Gamma + \int_{\Gamma_{ij}} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n_i} v \, d\Gamma + \int_{\Gamma_{ji}} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n_j} v \, d\Gamma = 0, \end{aligned} \quad (19)$$

где $\Gamma = \Gamma_0 \cup \Gamma_s \cup \Gamma_N \cup \Gamma_{ij}$; $\vec{n}_0$ — единичная внешняя нормаль к Γ_0 ; $\vec{n}_i$ — единичная внешняя нормаль к Γ_{ij} ; $\vec{n}_j$ — единичная внешняя нормаль к Γ_{ji} , $\vec{n}_i = -\vec{n}_j$.

С учетом (9)–(12) вариационное уравнение (19) примет вид

$$- \int_{\Omega} \sigma \operatorname{grad} \varphi \cdot \operatorname{grad} v \, d\Omega = 0. \quad (20)$$

Для второй задачи вариационная формулировка в форме Галеркина имеет вид: найти $\varphi \in H_0^1(\Omega)$ такое, что для любой функции $v \in H_0^1(\Omega)$ выполняется

$$\begin{aligned} - \int_{\Omega} \sigma \operatorname{grad} \varphi \cdot \operatorname{grad} v \, d\Omega + \int_{\Gamma_0} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n_0} v \, d\Gamma + \int_{\Gamma_s} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} v \, d\Gamma \\ + \int_{\Gamma_N} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} v \, d\Gamma + \int_{\Gamma_{ij}} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n_i} v \, d\Gamma + \int_{\Gamma_{ji}} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n_j} v \, d\Gamma = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

С учетом (14)–(18) вариационное уравнение (21) примет вид

$$- \int_{\Omega} \sigma \operatorname{grad} \varphi \cdot \operatorname{grad} v \, d\Omega + \int_{\Gamma_s} j_s v \, d\Gamma = 0. \quad (22)$$

Задачи могут быть решены с помощью узлового метода конечных элементов путем построения конечно-элементного аналога вариационных уравнений (20) и (22). Моделируемая область и объекты в ней разбиваются на конечные элементы определенного типа. На них задаются базисные функции [4]. В работе использовались линейные базисные функции на нерегулярном тетраэдральном разбиении, т. е. на отдельном конечном элементе функция определена только в вершинах тетраэдра [5]. Пример такого разбиения можно увидеть на рис. 1, б. Сетка сгущается в тех областях, где расположены влияющие на моделирование объекты и где наибольшие пространственные изменения электрического поля. Используя выбранный базис, получаем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Для ее решения использовался метод сопряженных градиентов [6] в параллельной реализации для графических процессоров (GPU). Ее решения являются значениями потенциала φ в узлах сетки. Значения векторного электрического поля $\vec{E}$ вычисляются в соответствии с (5).

3. Численный эксперимент. Электротомография часто выполняется с использованием равномерной площадной системы возбуждения-измерения (рис. 1, в). Рассмотрим профиль в непосредственной близости от скважин и металлических опор, частично погруженных в землю. Решим численно прямую задачу для одного из положений установки Веннера-альфа. Разобьем область, где проводятся электротомографические исследования (рис. 1, а) на ячейки

так, как это показано на рис. 1, в. Такой подход позволяет не перестраивать конечно-элементную сетку при каждом положении установки. Также целесообразно описывать положения объектов относительно электродов. Металлические опоры диаметром 2 м расположены в центрах следующих ячеек: (65–70 м; 60–65 м); (75–80 м; 60–65 м); (65–70 м; 80–85 м); (75–80 м; 80–85 м). Они заглублены на 10 м и выступают над дневной поверхностью на высоту 6 м. Диаметр лежащей на опорах трубы 4 м, ее длина ограничена областью моделирования. Обсадные трубы диаметром 3 м расположены в центрах следующих ячеек: (100–105 м; 75–80 м); (125–130 м; 75–80 м). Они заглублены на 50 м и выступают над дневной поверхностью на высоту 6 м. Предполагаемые зоны растепления представляют собой горизонтальные полусферы радиусом 4,5 м.

Питающие электроды с единичным током расположены в точках (60 м; 80 м) и (120 м; 80 м) сразу под дневной поверхностью $Z = 0$. Электропроводность пород примем равной 0,001 См/м, металла 7690000 См/м, зон растепления 0,01 См/м, воздуха 10^{-12} См/м. Результаты моделирования распределения электрического потенциала и поля по профилю $Y = 80$ м представлены на рис. 3, где использованы следующие обозначения: 1 — труба, 2 — правая скважина, 3 — левая скважина, 4 — часть П-образной опоры.

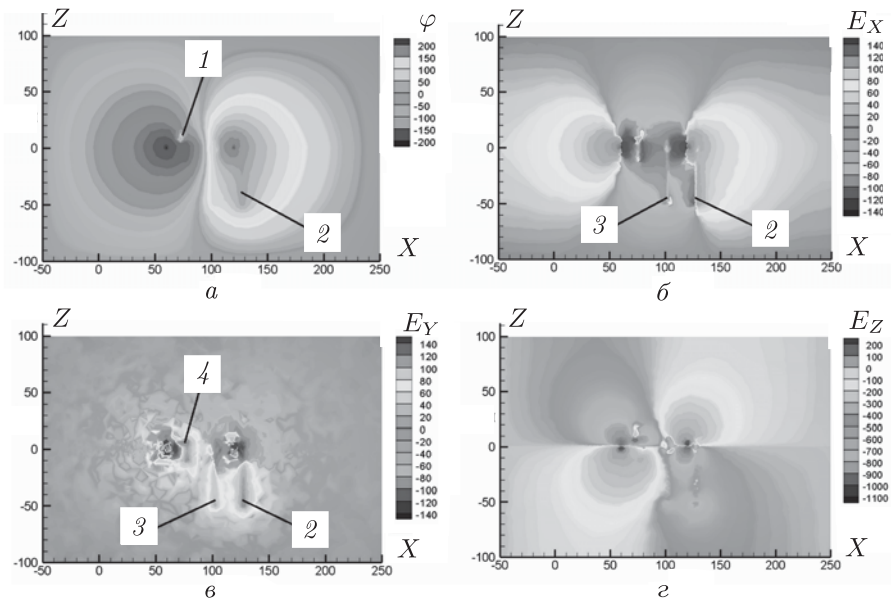


Рис. 3. Распределение электрического потенциала и поля в сечении XOZ ($Y = 80$):

a — электрический потенциал, b — X -компонента, v — Y -компонента, z — Z -компонента электрического поля

На карте электрического потенциала (рис. 3, a) выделяются лежащая на опорах труба и правая скважина. На карте X -компоненты электрического поля (рис. 3, b) выделяются обе скважины. Карта Y -компоненты (рис. 3, v) дает наиболее полное представление о металлических конструкциях, здесь видны и часть П-образной опоры и обе скважины. На карте вертикальной компоненты электрического поля (рис. 3, z) практически не видно заглубленных объектов.

Вместе с тем отметим, что в реальных исследованиях измерения выполняются только на дневной поверхности (рис. 1, в). На рис. 4 показано распределение компонент электрического поля в сечении XOY . На рис. 4, a и b показано распределение горизонтальных компонент электрического поля при $Z = 0$.

Немаловажным остается вопрос об условиях обнаружения зон растепления. На рис. 4, v и z приведено распределение горизонтальных компонент электри-

ческого поля на поверхности среды в случае, когда зоны растепления отсутствуют. На рис. 4, *д* и *е* приведена карта аномальных значений горизонтальных компонент электрического поля, обусловленных зонами растепления.

Таким образом, изменяя положение питающих и приемных электродов, можно с определенной долей достоверности восстановить истинное положение объектов внутри моделируемой среды.

На первом шаге все измеренные сигналы трансформируются в кажущиеся сопротивления (КС) [7, 8] $\rho_k = k \frac{U_{MN}}{I_{AB}}$, где U_{MN} — измеряемая разность потенциалов между электродами M и N ; $k = 2\pi / \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right)$ — коэффициент установки; I_{AB} — ток в линии AB .

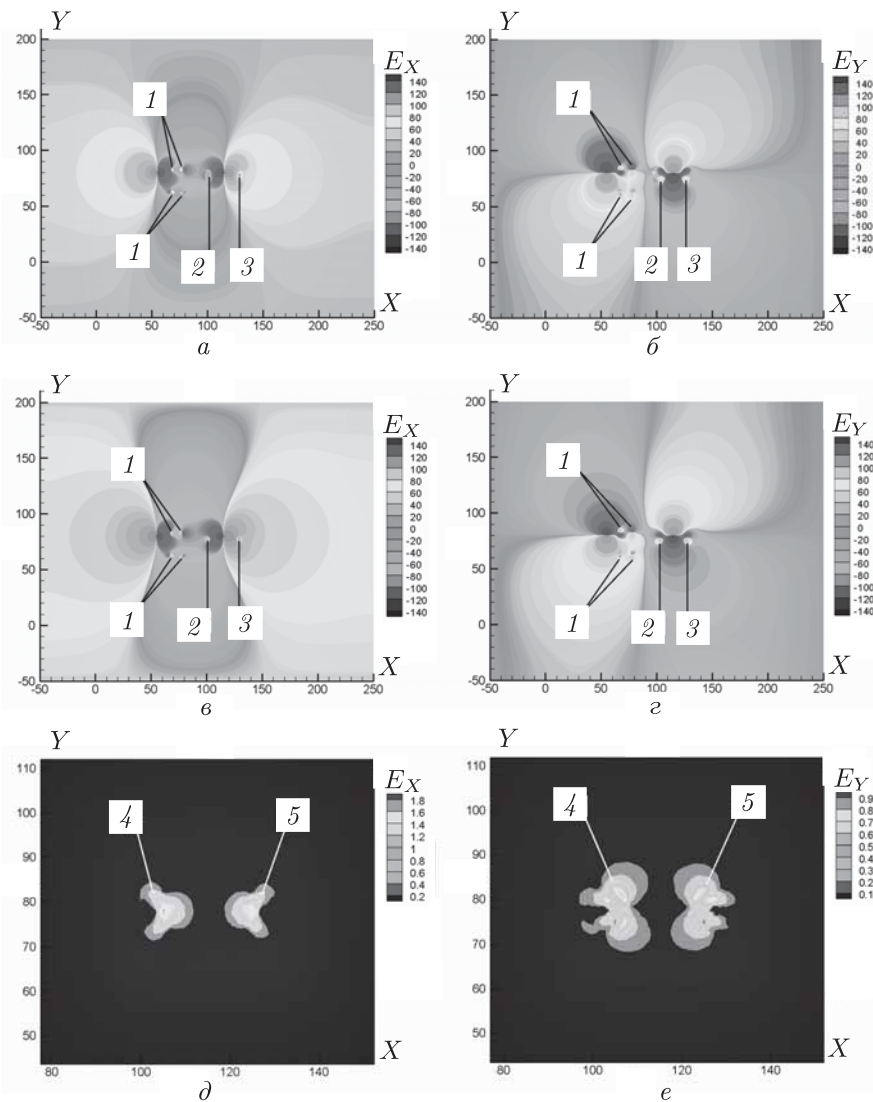


Рис. 4. Распределение электрического поля в сечении XOY ($Z=0$):

- a* — X -компонента, *б* — Y -компонента с зонами растепления;
- в* — X -компонента, *г* — Y -компонента без зон растепления;
- д* — аномальная X -компонента, *е* — аномальная Y -компонента, обусловленные зонами растепления

На рис. 4 использованы обозначения: 1 — металлические опоры, 2 — левая скважина, 3 — правая скважина, 4 — левая зона растепления, 5 — правая зона растепления.

Для построения непрерывного распределения КС значения проинтерполированы либо с помощью алгоритма Делоне [9], либо диаграмм Вороного [10].

Отдельным вопросом является реалистичная оценка глубинности. Согласно [2] она определяется следующими основными факторами: установкой, моделью и погрешностями измерений. Традиционно глубинность исследований связывается с расстоянием между питающими электродами, расположенными в точках A и B , которое мы будем обозначать AB — разнос установки, который, в случае установки Веннера-альфа, совпадает с длиной отрезка AB , т. е. расстоянием между питающими электродами, расположенными в точках A и B . Наиболее ранняя из них, равная $AB/2$, была получена для четырехэлектродной установки Шлюмберже [11]. Затем она была уточнена для установок Веннера и диполь-диполь [12–14], составив $AB/3$ или половину расстояния между диполями соответственно. Современные медианные оценки [15] менее оптимистичны и варьируются от $0,105AB$ до $0,175AB$ для установки Веннера-альфа и от $0,125AB$ до $0,19AB$ — для установки Шлюмберже. Такие оценки, не связанные с погрешностями измерений, создают ложное представление об обязательном увеличении глубинности при возрастании разноса. При этом не учитывается тот факт, что с увеличением расстояния между электродами, расположенными в точках A и B , значение измеряемой разности потенциалов закономерно уменьшается. При фиксированной минимальной величине измеряемого сигнала относительная погрешность измерений возрастает, а глубинность падает, поскольку значительная доля сигнала обусловлена шумом, а не средой. В предельном случае, когда сигнал становится меньше минимально измеримого, понятие глубинности исчезает, поскольку в измеряемых сигналах нет информации о среде.

Оценим максимальную глубину, на которой установкой Веннера-альфа обнаруживается проводящий или изолирующий слой большой (по сравнению с расстоянием между электродами, расположенными в точках A и B) мощности. Разнос $AB = 60$ м. Коэффициент установки $k = 125,6$. Поместим на глубину 100 м пробный изолирующий (электропроводность 10^{-12} См/м) или сильно проводящий (электропроводность 7690000 См/м) слой мощностью 300 м. Будем перемещать его вверх, приближаясь к дневной поверхности с шагом 10 м. На рис. 5 приведена зависимость измеряемой разности потенциалов от глубины кровли пробного слоя. Считается, что объект обнаружен, если реакция на него превысила в два раза порог погрешности измерений (5 процентов) в реальных условиях.

Как видно из рис. 5, заметная реакция на объект наблюдается уже на глубине от $0,8AB$ до $0,9AB$, что соответствует наивысшим оценкам глубинности для всех возможных четырех-электродных установок [15]. Однако нужно учесть, что при такой оценке в качестве пробного объекта выступал бесконечный по простиранию слой, электропроводность которого сильно отличается от электропроводности вмещающей среды. Поэтому полученную оценку глубинности будем считать предельной, а не медианной или средней.

На рис. 6 показаны разрезы КС, аномалии и аномальные поля. На рис. 6 использованы обозначения: 1 — металлические опоры, 2 — левая скважина с зоной растепления, 3 — правая скважина с зоной растепления, 4 — аномалия, 5 — одиночная скважина без зоны растепления, 6 — зона растепления.

На рис. 6, а, б, в показаны распределения КС до глубины, равной $AB/2$. Рассмотрим КС на профиле ($Y = 80$ м) вкост простирания самой большой металлической трубы, лежащей на П-образных опорах (рис. 1, а). Из рис. 6, а видно, что на разрезе КС металлические опоры сливаются в единый «объект», зоны растепления выделяются достаточно четко, в то время как скважины образуют аномалию в области между ними на условных глубинах примерно

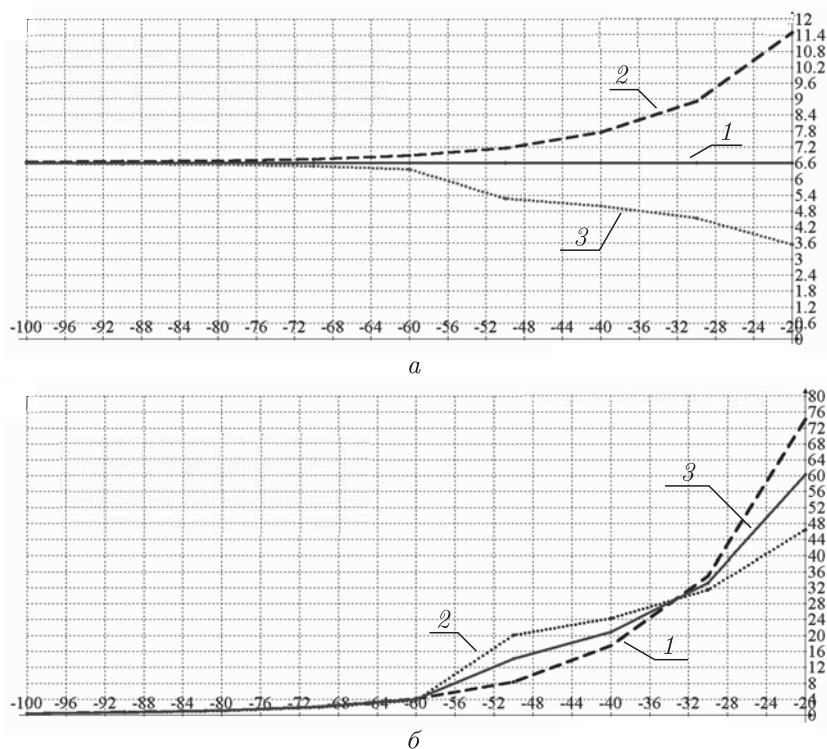


Рис. 5. Зависимость разности потенциалов и относительного изменения сигнала от глубины кровли пробного слоя (м):

- (а) разность потенциалов (В): 1 — полупространство без пробного слоя, 2 — изолирующий пробный слой, 3 — проводящий пробный слой;
 (б) относительное изменение сигнала (%): 1 — изолирующий пробный слой, 2 — проводящий пробный слой, 3 — усредненные значения

от 10 до 25 м. При этом влияние длинной трубы остается минимальным. Рассмотрим КС на ортогональном профиле ($X = 70$ м). Он проложен в непосредственной близости от П-образных опор и параллелен трубе, лежащей на них (рис. 1, а). На этом разрезе (рис. 6, б) видна низкоомная аномалия, обусловленная П-образными опорами. Однако ее глубина (от 10 до 40 м) существенно больше, чем в предыдущем случае, хотя сами П-образные опоры расположены не так глубоко, как скважины. Эта аномалия характеризуется такими большими размерами по двум причинам: а) четыре П-образные опоры сливаются в одну; б) значительно усиливается влияние трубы, расположенной на П-образных опорах, поскольку она на всем профиле находится над питающими и измерительными электродами.

Рассмотрим модель с обсаженной металлической трубой скважиной, расположенной в центре области, где выполняется электротомография (рис. 1, а). Все размеры и электрофизические параметры идентичны предыдущей модели. Глубина скважины увеличена до 100 м. Число возможных расположений установки Веннера-альфа на профиле также увеличено с 63 до 392 в соответствии с возросшей глубиной скважины. Разрез КС показан на рис. 6, в. Видно, что даже одиночная обсаженная скважина порождает аномалию сложного строения. Ее центральную часть занимает высокоомная каплевидная область, погруженная в трапецевидную область средних значений КС. В верхней части разреза вблизи скважины выделяются наклонные полосы низких величин КС. Наличие трапецевидальной аномалии связано с тем, что обсадная метал-

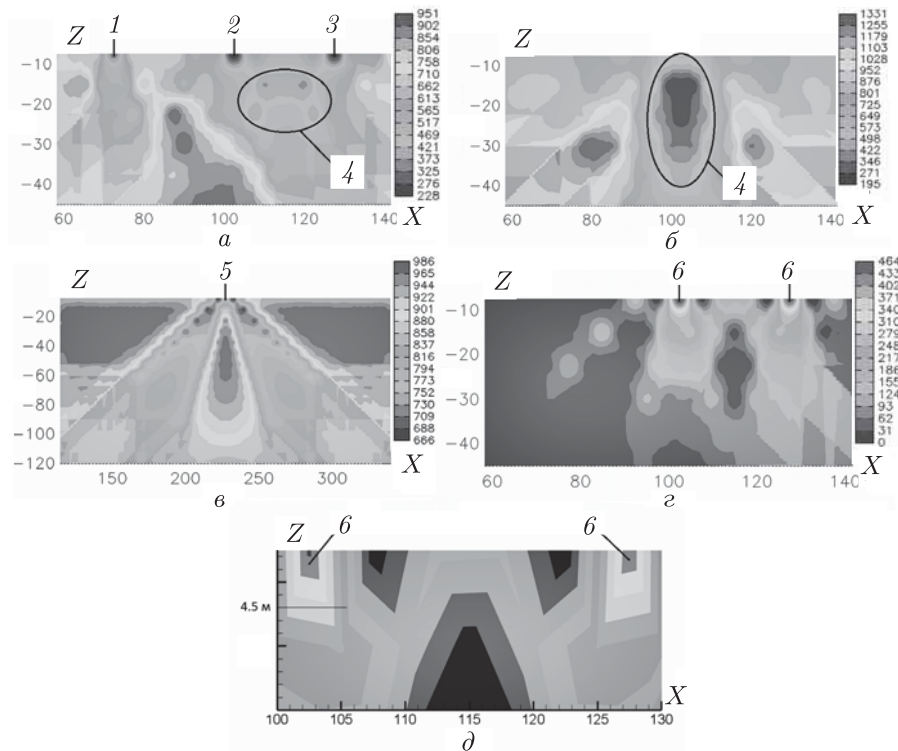


Рис. 6. Разрезы КС, аномалии и аномальные поля:
 а — разрез КС ($Y = 80, Z = 0$) с разным положением установки;
 б — разрез КС ($X = 70, Z = 0$) с разным положением установки;
 в — разрез КС ($Y = 80, Z = 0$) для одиночной скважины в центре области;
 г — распределение аномального поля
 (интерполяция с помощью диаграмм Вороного);
 д — область с аномалиями (интерполяция с помощью триангуляции Делоне)

лическая труба сама становится источником тока, который с ее поверхности стекает в окружающую среду. Столь сложное распределение КС несомненно будет препятствовать корректной работе алгоритмов инверсии [16].

Если же исходная задача заключается в обнаружении только отдельных объектов, то можно не прибегать к сложным и неэффективным алгоритмам инверсии. Например, проведя численное моделирование исходной задачи (рис. 1, а) без зон растепления и вычислив аномальное поле (модуль разности полей) электрического потенциала, можно получить распределение, на котором отчетливо выделяются зоны растепления (рис. 6, г). Значения КС в данном случае рассчитать нельзя. Однако можно установить наличие аномалии, причем (если судить по рис. 6, д) с достаточно точной информацией о ее размерах как по ширине, так и по глубине. Если имеется предполагаемая модель среды и объектов в ней и есть измерения, полученные в полевых условиях, то, рассчитав разности полей электрических потенциалов, можно определить, насколько точной является исходная модель и где именно «нарушены» ее оценки. Разница между многолетними наблюдениями подобного типа может сообщить исследователю о том, где и как изменяется модель, что также является немаловажным.

Заключение. Проведены эксперименты на кустовой площадке, которые показали, что наличие сильно проводящих объектов как в исследуемой среде, так и выше нее могут приводить к существенным аномалиям в модели кажущейся

щихся сопротивлений. Алгоритмы инверсии способны лишь частично подавлять подобные аномалии. При этом предварительное моделирование прямой задачи позволяет определить те точки профилей, которые можно исключить из начальной модели для уменьшения влияния сильно проводящих объектов. В ходе исследований были программно реализованы алгоритмы, которые позволяют проводить расчеты прямых задач в сложных по форме областях, исключать из начальной модели лишние для исследователя точки, получать аномальное поле и проводить графический анализ данных. Все представленные результаты получены непосредственно в реализованном программном комплексе с минимальным привлечением стороннего программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изучение многолетнемерзлых пород с использованием комплекса методов инженерной геофизики (на примере кустовой площадки нефтегазоконденсатного месторождения в Западной Сибири) / К. С. Сергеев и др. // Инженер. изыскания. 2015. № 10–11. С. 46–53.
2. Электроразведка методом сопротивлений / С. А. Акуленко и др.: Учебн. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1994.
3. Страттон Д. А. Теория электромагнетизма. М.: Гостехиздат, 1948.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
5. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986.
6. Баландин М. Ю., Шурина Э. П. Методы решения СЛАУ большой размерности. Новосибирск: изд. НГТУ, 2000.
7. Доброхотова И. А., Новиков К. В. Электроразведка: Учебн. пособие. М.: Изд-во РГГРУ, 2009.
8. Blessing I. E., Funmilola R. N., Ahzegbabor P. A. Estimation of hydraulic parameters from vertical electrical resistivity sounding // J. Inform. Math. Sci. 2017. V. 9, N 2. P. 285–296.
9. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2002.
10. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия. Введение. М.: Мир, 1989.
11. Schlumberger C., Schlumberger M. Depth of investigation attainable by potential methods of electrical exploration // AIME Trans. Geophys. Prospect. 1932. P. 127–133.
12. Frohlich R. K. The depth penetration of dipole arrays compared with the schlumberger arrangement // Geoelectrical. 1967. N 5. P. 195–203.
13. Keller G. V. Dipole method for deep resistivity studies // Geomorphology. 1966. V. 31, N 6. P. 1088–1104.
14. Zhody A. A. R., Jackson D. B. Application of deep electrical sounding for groundwater exploration in Hawaii // Geophysics. 1969. V. 34, N 4. P. 584–600.
15. Szalai S., Novak A., Szarka L. Depth of investigation and vertical resolution of surface geoelectric arrays // J. Environ. Engrg. Geophys. 2009. V. 14, N 1. P. 15–23.
16. Rucker C. Advanced Electrical Resistivity Modelling and Inversion using Unstructured Discretization: Dissertation. Leipzig, 2011.

Поступила в редакцию 1 октября 2018 г.

После доработки 25 октября 2018 г.

Принята к публикации 15 декабря 2018 г.

Мариненко Аркадий Вадимович

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
просп. Акад. Коптюга, 3

Эпов Михаил Иванович

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2

Оленченко Владимир Владимирович

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
630090 г. Новосибирск

E-mail: arkadiy@reqip.net; EpovMI@ipgg.sbras.ru; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru