

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.942

DOI: 10.17212/2782-2001-2024-2-69-84

Анализ эквивалентности трехмерных моделей при 3D-интерпретации данных аэроэлектроразведки*

А.П. СИВЕНКОВА

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный
технический университет

sivenkova.2014@stud.nstu.ru

Статья посвящена проблеме эквивалентности трехмерных геоэлектрических моделей, получаемых в результате 3D-интерпретации данных аэроэлектроразведки в средах, где локальные проводящие тела перекрыты неоднородным приповерхностным слоем. Для проведения исследований были использованы данные аэроэлектроразведки, выполненной на территории Creighton (Канада) при поиске полиметаллических руд. Для построения геоэлектрической модели использовалась двухэтапная 3D-инверсия. Первый этап 3D-инверсии заключался в восстановлении приповерхностных структур по данным съемки, полученным ранее. Второй этап 3D-инверсии основывался на карте невязок, построенной по практическим сигналам и сигналам, полученным после первого этапа 3D-инверсии, полученным позднее. По карте невязок задавались стартовые положения локальных тел под перекрывающим слоем и в ходе локальных 3D-инверсий определялись их геометрия и свойства. По результатам 3D-инверсии было выделено локальное проводящее тело, подтверждаемое данными бурения. Для трехмерной модели этого тела проводился анализ эквивалентности. Были рассмотрены различные варианты стартовых моделей, отличающиеся количеством блоков, описывающих тело, а также варианты изменения размеров блоков в модели, полученной в результате 3D-инверсии. Было установлено, что основная эквивалентность связана с большим расстоянием между полетными линиями, которое значительно больше расстояния между положениями установки на профиле. Поэтому большинство эквивалентных моделей характеризуется уменьшением размера блоков в направлении, ортогональном профилям, за счет увеличения их размера вдоль профиля и изменения сопротивления. При этом по критерию проводки скважин полученные эквивалентные модели были достаточно близкими, т. е. с геологической точки зрения принципиальной разницы между полученными эквивалентными моделями не было получено.

* Статья получена 01 февраля 2024 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (НИЛ «Моделирование и обработка данных наукоемких технологий», проект № FSUN-2024-0003).

Ключевые слова: аэрогеофизика, аэроэлектроразведка, трехмерные обратные задачи, 3D-интерпретация, анализ эквивалентности, твердые полезные ископаемые, численное 3D-моделирование, электромагнитное поле

ВВЕДЕНИЕ

Аэроэлектроразведка применяется для поиска на больших площадях месторождений полезных ископаемых, которые часто перекрыты неоднородными приповерхностными слоями. Информация, полученная на основе обработанных данных, позволяет определить местоположение целевого объекта и спроектировать траектории бурения скважин. В последнее время всё чаще применяются 3D-инверсии, которые позволяют гораздо точнее восстанавливать геоэлектрическую модель по сравнению с 1D-инверсиями [1]. Одномерные же инверсии чаще применяются как сопроводительная процедура при съемке данных, чтобы в режиме реального времени оценить качество сигналов и собрать предварительную информацию об основных геологических слоях [3]. При этом методы анализа эквивалентности геоэлектрических моделей разработаны в основном для оценки результатов 1D-инверсий [2–5].

Настоящая работа посвящена анализу эквивалентностей при восстановлении проводящих тел, залегающих под неоднородным приповерхностным слоем, с помощью 3D-инверсии. Предлагаемый подход позволит оценивать качество 3D-инверсий, выполняемых при обработке данных аэросъемки на больших площадях.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ГЕОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Для решения трехмерных задач геоэлектромагнетизма довольно эффективным является метод выделения поля, который в англоязычной научной литературе называют «primary-secondary field approach» [6–12]. Этот метод позволяет получить решение трехмерной задачи с требуемой точностью на достаточно грубых сетках, построенных в расчетных областях относительно небольшого размера. В качестве первичного поля, как правило, используют поле некоторой 1D-модели, которое можно рассчитать очень точно с невысокими вычислительными затратами. Для задач аэроэлектроразведки (особенно при сильных изменениях рельефа), где источник находится относительно далеко от проводящей среды, в качестве первичного поля вполне достаточно использовать поле источника в однородной непроводящей среде [11].

Итак, напряженность полного электрического поля $\vec{E}^t$ и индукцию полного магнитного поля $\vec{B}^t$ определим по формулам:

$$\vec{E}^t = \vec{E}^s + \vec{E}^p, \quad \vec{B}^t = \vec{B}^s + \vec{B}^p, \quad (1)$$

где функции $\vec{E}^p$ и $\vec{B}^p$ описывают соответственно электрическое и магнитное поле в однородной непроводящей среде, а функции $\vec{E}^s$ и $\vec{B}^s$ описывают поле влияния проводящей трехмерной среды.

Поскольку временной диапазон, который мы будем рассматривать в настоящей работе, начинается с 80 мкс, токи смещения несущественные, и поэтому функции $\vec{E}^t$ и $\vec{B}^t$ удовлетворяют закону Ампера:

$$\nabla \times \frac{\vec{B}^t}{\mu_0} = \vec{J}^{source} + \sigma \vec{E}^t, \quad (2)$$

где $\nabla \times$ – ротор (дифференциальный оператор); μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; $\vec{J}^{source}(x, y, z)$ – плотность тока в генераторной петле; $\sigma(x, y, z)$ – удельная электрическая проводимость трехмерной среды.

Функция $\vec{B}^p$ в однородной непроводящей среде также удовлетворяет закону Ампера:

$$\nabla \times \frac{\vec{B}^p}{\mu_0} = \vec{J}^{source}. \quad (3)$$

Вычитая (3) из (2) и принимая во внимание соотношения (1), получим

$$\nabla \times \frac{\vec{B}^s}{\mu_0} - \sigma \vec{E}^s = \sigma \vec{E}^p. \quad (4)$$

Введем вектор-потенциал вторичного поля $\vec{A}^s(x, y, z, t)$ такой, что

$$\vec{E}^s = -\frac{\partial \vec{A}^s}{\partial t}, \quad \vec{B}^s = \nabla \times \vec{A}^s. \quad (5)$$

Касательные составляющие $\vec{A}^s$ на границах расчетной области и начальное значение $\vec{A}^s$ внутри расчетной области задаются равными нулю.

Подставляя соотношения (5) в уравнение (4), получим

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A}^s \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}^s}{\partial t} = \sigma \vec{E}^p. \quad (6)$$

Функции $\vec{E}^p$ и $\vec{B}^p$ полностью определяются заданной зависимостью тока от времени в генераторной петле. Они могут быть рассчитаны либо аналитически, либо с использованием осесимметричной задачи [13].

Аппроксимация по времени выполняется с использованием трехслойной неявной схемы «с перешагиванием назад». Подробно этот аппарат рассмотрен в работе [11]. При этом известно, что задачи аэроэлектроразведки относятся к классу multisource, и на одной площади количество положений аэросистемы может достигать нескольких десятков и даже сотен тысяч. Поэтому для повышения эффективности их решения используется пространственно-временное группирование [11] и автоматическое построение оптимизированных неконформных сеток для каждой группы. Алгоритмы автоматического построения оптимизированных неконформных сеток с учетом группирования и распараллеливания, а также оптимальные параметры их построения для решения задач аэроэлектроразведки представлены в работе [14].

Верификация подходов к решению прямой задачи была выполнена с использованием решений для 1D- и 3D-моделей, полученных другими авторами, среди которых модели с холмом и впадиной, наклонным проводящим объектом со средним и высоким контрастом к вмещающей среде, а также реальной функцией тока в источнике. Результаты верификации подробно представлены в работе [11]. Анализ точности решения прямых задач, выполненный с использованием вложенных сеток, показывает, что погрешность решения лежит в пределах 1...3 %.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

Компоненты вектора параметров $\mathbf{b} = \{b_j, j = 1 \dots N^b\}$, описывающих геоэлектрическую модель, определим путем минимизации функционала [16, 17]:

$$\Phi^\alpha(\mathbf{b}) = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L (\omega_{il} \delta \varepsilon_{il}(\mathbf{b}))^2 + \sum_{j=1}^{N^b} \alpha_j (b_j - \bar{b}_j) \rightarrow \min_{b_j}, \quad (7)$$

где N – количество положений аэросистемы; L – количество временных каналов; $\delta \varepsilon_{il}$ – разность измеренного и расчетного сигналов в i -м приемнике в l -й момент времени; ω_{il} – весовые коэффициенты, которые определяются как величины, обратные значениям соответствующих измеренных сигналов.

Поскольку обратная задача изначально является некорректно поставленной, в минимизируемый функционал (7) добавлен регуляризирующий член (последнее слагаемое), обеспечивающий однозначность определения параметров b_j , по которым минимизируется функционал [15].

Компоненты b_j вектора параметров определяют значения геометрических и физических параметров геофизической модели ($\bar{b}_j$ – значения компонент вектора параметров на предыдущей итерации). В настоящей работе геофизическая модель представляется в виде блочных структур, которые представляют собой ряды блоков вдоль одной из координат.

Для минимизации функционала (7) используется метод Гаусса – Ньютона с сегментацией данных и параметров [16, 18], а коэффициенты регуляризации α_j подбираются адаптивно на каждой итерации [17].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ 3D-ИНТЕПРЕТАЦИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Для проведения исследований использовались полевые данные электромагнитных (ЭМ) зондирований, выполненных на территории Creighton (Канада) с помощью аэрогеофизической вертолетной платформы HeliTEM (<https://geophysical-data.canada.ca/Portal/Search>).

При выполнении предварительного этапа 3D-инверсии данных ЭМ съемки в приповерхностном слое была задана блочная структура с блоками размером $300 \times 300 \text{ м}^2$. Учитывая тот факт, что первое время съемки является

достаточно поздним – 80 мкс, детализация самой верхней части разреза является проблематичной, и поэтому для моделирования влияния перекрывающих пород использовался один слой с фиксированной толщиной 10 м, верхняя и нижняя границы которого повторяли рельеф дневной поверхности.

На рис. 1 приведено предварительное распределение удельного электрического сопротивления в перекрывающем слое, распределение невязки на времени 767 мкс.

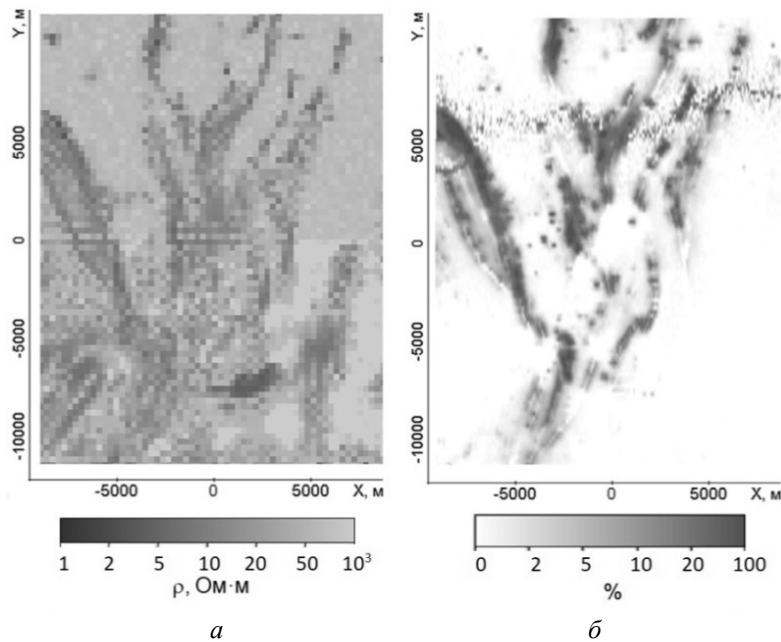


Рис. 1. Результаты предварительного этапа 3D-интерпретации:

a – предварительное распределение сопротивления в перекрывающем слое;
б – невязки в ЭМ данных на времени 767 мкс

Fig. 1. Results of the preliminary stage of 3D interpretation:

a is preliminary distribution of resistivity in the overlying layer;
b is residuals in EM data at a time of 767 μ s

Для проведения основного этапа 3D-инверсии данных ЭМ съемки в областях высокой невязки под перекрывающим слоем было задано начальное положение локальных блочных структур. На рис. 2 представлены блочные структуры, которые были получены в результате этого этапа 3D-инверсии данных ЭМ съемки. На рис. 2, б приведен укрупненный вид блочной структуры **M1** и части структуры **M2**. Блочная структура **M1** соответствует основному телу месторождения Bigstone Lake [19, 20], что подтверждается шестью пробуренными скважинами (траектории скважин и их номера показаны на рис. 2, б).

На рис. 3 приведены графики измеренных и расчетных сигналов ЭМ съемки вдоль двух профилей, соответствующих координатам $Y = -6750$ м, -6950 м. Эти профили пересекают основное тело месторождения Bigstone Lake [19, 20]. Сигналы представлены на двух временных каналах: 86 мкс и 767 мкс. На графиках отмечены зоны, которые соответствуют проекциям блочных структур **M1**, **M2** и **M3** на профили съемки.

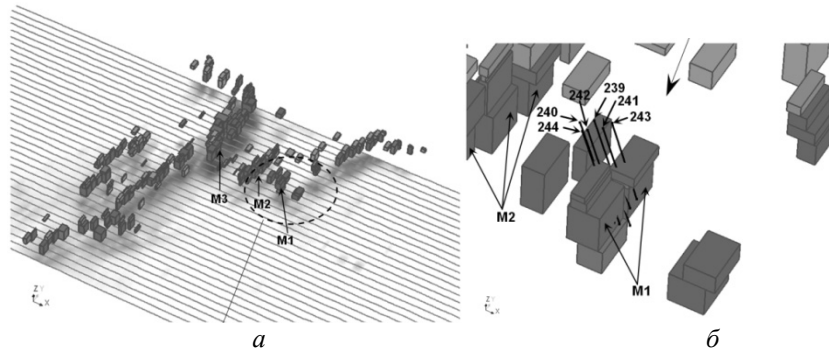


Рис. 2. Блочные структуры, полученные в результате 3D-инверсии данных ЭМ съемки:

a – блоки с $\rho < 15 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; *b* – укрупненный вид блочных структур **M1** и **M2**; вертикальными линиями и номерами обозначены скважины, пробуренные на месторождении Bigstone Lake [19, 20]

Fig. 2. Block structures obtained as a result of 3D inversion of EM survey data:

a is blocks with $\rho < 15 \text{ } \Omega\text{m}$; *b* is an enlarged view of block structures **M1** and **M2**; vertical lines and numbers indicate wells drilled in the Bigstone Lake field [19, 20]

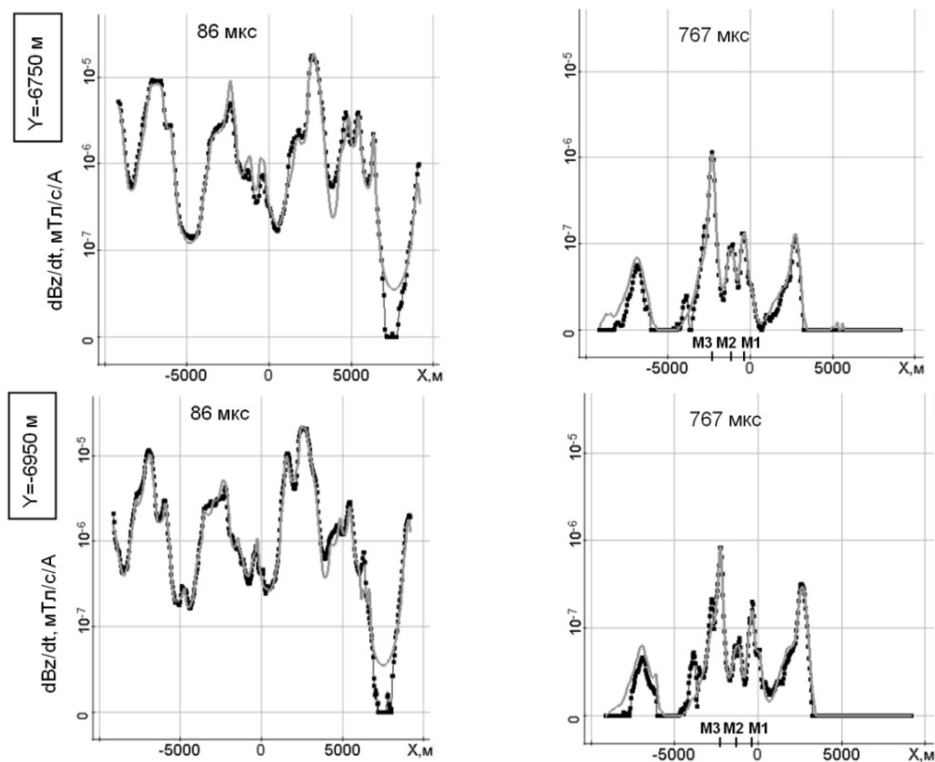


Рис. 3. Графики измеренных (черные линии с метками) и расчетных (серые линии без меток) сигналов ЭМ съемки вдоль двух профилей на двух временных каналах

Fig. 3. Graphs of measured (black lines with marks) and calculated (gray lines without marks) EM survey signals along two profiles on two time channels

4. АНАЛИЗ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ 3D-МОДЕЛЕЙ ЛОКАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Важным этапом проверки достоверности получаемых результатов является анализ эквивалентности. При этом если эквивалентность 1D-моделей довольно часто рассматривается в литературе [2–5], то для 3D-моделей, которые характеризуются как значительно большим числом параметров (для рассматриваемой съемки это несколько тысяч параметров), так и несколькими другими типами эквивалентности (из-за ограниченных размеров объектов по латерали), оценка эквивалентности почти не рассматривается, хотя также является очень важной для оценки степени достоверности геологического прогноза.

В 3D-модели оценку эквивалентности желательно максимально связать с решаемой геологической задачей. В данном случае потенциально целевыми объектами являются проводящие тела, залегающие под неоднородным перекрывающим приповерхностным слоем. Одним из таких объектов, выделенных в результате 3D-инверсии, является структура **M1**, которая составлена из нескольких блоков (см. рис. 2, б).

Анализ эквивалентности проводится для этой структуры при фиксированных параметрах остальных локальных структур и блоков верхнего слоя.

Эквивалентность получаемых моделей оценивается по критерию изменения $\delta\Phi$ функционала ошибки Φ (взвешенных невязок между измеренными и расчетными данными):

$$\delta\Phi = \frac{\Phi^C - \Phi^R}{\Phi^R} 100 \%, \quad \Phi(\mathbf{b}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L (\omega_{il} \delta\epsilon_{il}(\mathbf{b}))^2}{NL}}, \quad (8)$$

где Φ^R – значение функционала ошибки для модели, полученной в результате 3D-инверсии; Φ^C – значение функционала ошибки для моделей, получаемых при оценке эквивалентности; N – количество положений аэросистемы.

Для проведения представленных ниже исследований используется 118 положений аэросистемы, расположенных непосредственно над структурой и несколько сбоку от структуры, с четырех полетных линий (профилей), две из которых расположены над структурой и две – по бокам от структуры (расстояние между линиями составляет 200 м). Значение Φ для полученной в результате 3D-инверсии модели и этого набора приемников составило $\Phi^R = 0,189$.

Вначале анализируется возможность получения эквивалентных моделей при использовании других стартовых моделей, содержащих меньшее число блоков. Использование меньшего числа блоков снижает количество эквивалентных моделей, но может ухудшать точность восстановления геометрии тела и, как следствие, увеличивать функционал ошибки. Рассматриваются три блочные структуры, показанные в верхнем ряду рис. 4. Структуры состоят из двух частей. Части этих структур с меньшими координатами по оси Y будут называться «ближними» (так как на рис. 4 эти части расположены ближе

к наблюдателю), а их части с большими координатами по оси Y – «дальними» (на рис. 4 эти части расположены дальше от наблюдателя). В нижнем ряду рис. 4 показаны результаты 3D-инверсий для этих трех структур, обозначенные нами как M1_C1, M1_C2, M1_C3. Значение Φ для полученной в результате 3D-инверсии модели и этого набора приемников составило $\Phi^R = 0,189$. Значение функционала ошибки для структуры M1_C2 составило $\Phi^C = 0,195$ ($\delta\Phi = 3,1\%$), а для структуры M1_C3 составило $\Phi^C = 0,227$ ($\delta\Phi = 20,1\%$).

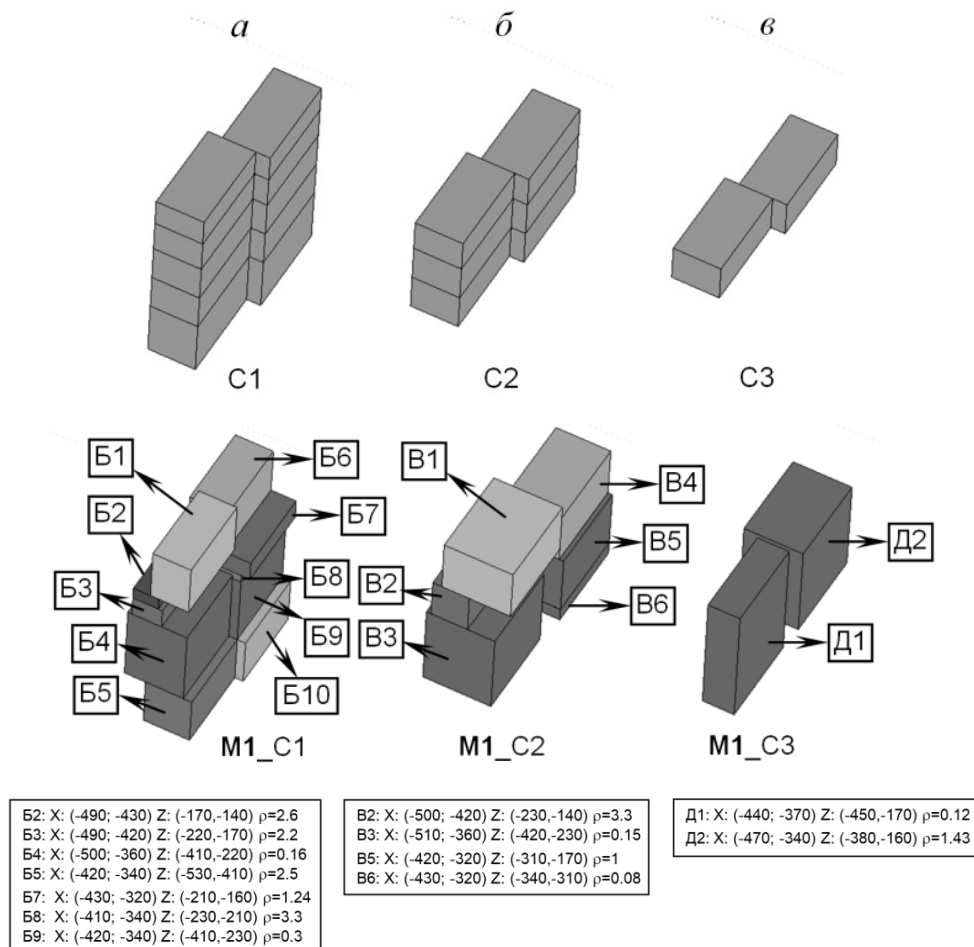


Рис. 4. Стартовое состояние блочных структур и результат 3D-инверсии

Fig. 4. Starting state of block structures and the result of 3D-inversion

Полагается, что область эквивалентности определяется изменением функционала ошибки $\delta\Phi$ в пределах 5 %. Таким образом, модель M1_C2, представленную на рис. 4, б, можно считать эквивалентной, а модель M1_C3 на рис. 4, в – нет. При этом полученные эквивалентные модели M1_C1 и M1_C2 достаточно хорошо совпадают (по крайней мере, по критерию проектирования траектории скважин, рис. 5 и 6). Так, «ближняя» часть структур

включает в себя две основные составляющие. Первая составляющая имеет сопротивление, равное первым единицам $\text{Ом} \cdot \text{м}$ с верхней границей на глубине 140 м и размером 70...80 м по оси X (в модели $M1_C1$ на рис. 4, а она представлена двумя близкими по размеру в плане и сопротивлению блоками Б2, Б3, а в модели $M1_C2$ ей соответствует блок В2). Второй составляющей соответствует блок Б4 в модели $M1_C1$ и блок В3 в модели $M1_C2$ с сопротивлением, равным первым десятым долям $\text{Ом} \cdot \text{м}$, верхней границей на глубине 220 м и размером 140...150 м по оси X . «Дальняя» часть структуры также является составной и имеет размер по оси X примерно 90...110 м. Верхняя граница этой части структуры расположена на глубине 160...170 м, а ее сопротивление меняется с глубиной от первых единиц до десятых долей $\text{Ом} \cdot \text{м}$.

Далее анализируются отдельные параметры блоков структуры $M1_C1$ и оценивается возможность получения эквивалентных моделей. Для моделей, у которых значения Φ^C будут выше, чем 0,189 (полученное для модели $M1_C1$), будет приводиться только значение $\delta\Phi$.

- Блоки Б1, Б6. Они не представляют интереса с точки зрения целевых объектов, но их исключение может повлиять на параметры блоков, залегающих ниже. Исключаются блоки Б1, Б6 и подбираются электропроводности и z -координата верхней кромки блоков Б2, Б7. В результате исключения блоков Б1, Б6 z -координата верхней кромки блока Б2 составила минус 110 м (вместо минус 140 м), а блока Б7 – минус 150 м (вместо минус 160 м). При этом сопротивление блока Б2 увеличилось с 2,6 до 4,8 $\text{Ом} \cdot \text{м}$, а блока Б7 – с 1,24 до 1,4 $\text{Ом} \cdot \text{м}$. Так, в результате инверсии была получена модель, у которой $\delta\Phi = 1,6 \%$, и эту модель **$M1_C1_1$** можно признать эквивалентной. Здесь и далее символом «*» обозначаются измененные блоки, а в скобках указываются их измененные параметры, среди которых электропроводность блока σ и его границы по осям X (левая x^l и правая x^r), Y (ближняя y^{near} и дальняя y^{far}), Z (верхняя z^{up} и нижняя z^{down}).

- Блоки Б5, Б10. В результате инверсии со структурой, из которой исключили самые нижние блоки Б5, Б10, где подбирались электропроводности следующего ряда блоков Б4, Б9, была подобрана модель, у которой $\delta\Phi$ составляет менее 1 %. Поэтому можно считать блоки Б5, Б10 незначимыми, а полученную модель **$M1_C1_2$** – эквивалентной.

- Блоки Б2, Б3. Анализируется эквивалентность для блоков Б2, Б3. Вначале они исключаются из модели и выполняется инверсия с подбором сопротивления, а также x - и z -координат блоков Б1, Б4, расположенных выше и ниже блоков Б2, Б3. Для полученной в результате инверсии модели $\delta\Phi = 20 \%$. Это говорит о том, что блоки Б2, Б3 нельзя исключить из модели. Далее анализируется влияние их размера и положения вдоль оси Y . Уменьшение дальней y -координаты блоков Б2, Б3 на 50 м с подбором электропроводности и x -координат этих блоков привело к получению модели с $\delta\Phi = 4,8 \%$, что позволяет считать эту модель эквивалентной. Последовательное увеличение ближней y -координаты с подбором электропроводности и x -координат

этих блоков показало, что их размер не менее 80 м вдоль оси Y . Таким образом, анализ эквивалентности для блоков Б2, Б3 показал, что их нельзя исключить из модели, но для определения их размера и положения вдоль оси Y , перпендикулярной профилям съемки, необходима более плотная сеть профилей. Эта модель обозначена как **М1_C1_3**.

- Блок Б4. Анализируется влияние размера блока Б4 по оси Y через уменьшение размера блока Б4 вдоль оси Y (увеличиваем ближнюю и уменьшаем дальнюю y -координаты на 50 м). В результате инверсии с подбором сопротивления внутри этого блока x -координат и z -координаты нижней кромки значение $\delta\Phi$ составило 15 %. Последовательно увеличивая ближнюю y -координату блока Б4 и повторяя инверсию, получаем, что размер блока Б4 вдоль оси Y составляет не менее 80 м. При этом размер блока по оси X увеличился более чем в 2 раза, z -координата нижней кромки опустилась на –110 м, а сопротивление немного увеличилось. Эта модель обозначена как **М1_C1_4**. Что касается положения верхней и нижней кромок этого блока, то можно заключить, что классической эквивалентности $\sigma * h$ здесь нет: уменьшение размера по оси Z этого блока с соответствующим (подбираемым) смещением вниз блока и увеличением электропроводности приводит к значимому увеличению функционала. В данном случае эквивалентность связана со слабой чувствительностью к нижней границе блока Б4. Проведенные расчеты показывают, что толщина этого блока составляет не менее 70 м (модель **М1_C1_5** при $\delta\Phi = 2,4 \%$), при этом стоит отметить, что для эквивалентной модели с уменьшенным размером вдоль оси Y это значение увеличивается.

- Блок Б7. Выполняется инверсия с исключением блока Б7, в ходе которой подбираются электропроводности, а также x -координаты блоков Б6, Б8, Б9, расположенных выше и ниже блока Б7. Для полученной в результате инверсии модели $\delta\Phi = 9 \%$. Это говорит о том, что эта модель не является эквивалентной и этот блок из модели исключить нельзя. Далее анализируется, к чему будет приводить изменение координат блока Б7 вдоль оси Y . Уменьшая размер блока Б7 вдоль оси Y , увеличивая ближнюю и уменьшая дальнюю y -координаты на 50 м, проводим инверсию, в которой будет подбираться сопротивление внутри этого блока и координаты по оси X . Для полученной в результате инверсии модели $\delta\Phi = 18 \%$. К существенному увеличению Φ приводит увеличение ближней y -координаты без изменения дальней y -координаты. При последовательном уменьшении размера блока Б7 вдоль оси Y с помощью уменьшения дальней y -координаты и повторения инверсии было получено, что размер блока Б7 вдоль оси Y составляет не менее 100 м. При этом размер блока по оси X увеличился в 1,5 раза, а сопротивление уменьшилось в пять раз. Такая модель называется **М1_C1_6**. Увеличение дальней y -координаты не может превышать 50 м ($\delta\Phi = 4,7 \%$).

- Блок Б8. Выполняется инверсия с исключением блока Б8, в которой подбираются x -координаты границ и сопротивления выше- и нижележащих блоков Б7, Б9. Полученный в результате $\delta\Phi = 5,2 \%$ свидетельствует о том, что

совсем исключать этот блок из модели нельзя. При смещении нижней границы блока Б7 до координаты нижней границы блока Б8 и исключении блока Б8 выполняется подбор электропроводности в блоке Б7. Было получено значение $\delta\Phi = 1\%$. Сопротивление увеличилось в 1,6 раза. Эта модель – **M1_C1_7**.

• Блок Б9. Исключение Б9 из модели с подбором электропроводности и x -координат вышележащих блоков Б7, Б8 привело к $\delta\Phi = 18\%$. Это говорит о том, что этот блок из модели исключить нельзя. Уменьшение размера блока вдоль оси Y путем увеличения ближней и уменьшения дальней y -координат на 50 м инверсия с подбором электропроводности, x - и z -координат этого блока привела к $\delta\Phi = 6,3\%$. Уменьшение размера вдоль оси Y путем только увеличения ближней y -координаты также приводит к значимому увеличению Φ . Последовательно уменьшая размер блока Б9 вдоль оси Y путем уменьшения дальней y -координаты и повторяя инверсию, получим размер блока Б9 вдоль оси Y не менее 100 м, при этом размер блока по оси X увеличился в 2 раза, z -координата нижней кромки опустилась на 80 м, а сопротивление увеличилось почти в 2 раза. Эта модель – **M1_C1_8**. Что касается положения верхней и нижней кромок этого блока, то так же, как и для блока Б4, можно заключить, что классической эквивалентности $\sigma \cdot h$ здесь нет. Проведенные расчеты показывают, что толщина этого блока составляет не менее 100 м. Эта модель – **M1_C1_9**.

На рис. 5 и 6 показаны графики электропроводности вдоль скважин **243** (пересекает «дальнюю» часть структуры) и **244** (пересекает «ближнюю» часть структуры) для полученных выше эквивалентных моделей. Видно, что с геологической точки зрения принципиальной разницы между полученными эквивалентными моделями нет.

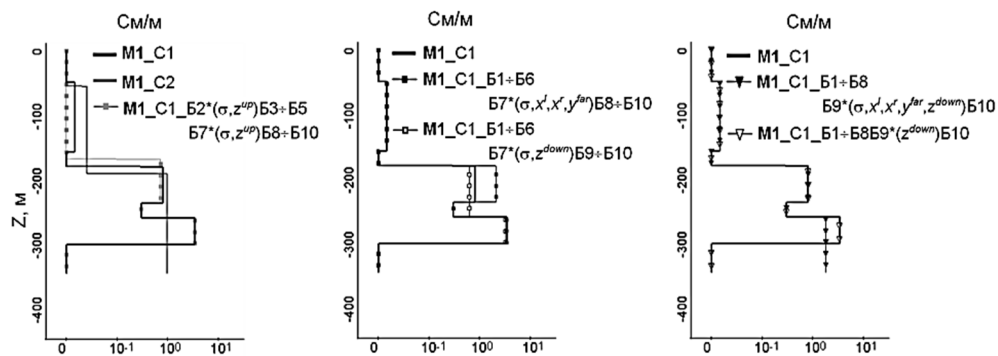


Рис. 5. Графики электропроводности вдоль скважины **243** для эквивалентных моделей (показаны только те эквивалентные модели, графики которых отличаются друг от друга по этой скважине)

Fig. 5. Conductivity plots along well 243 for equivalent models (only those equivalent models whose plots differ from each other for this well are shown)

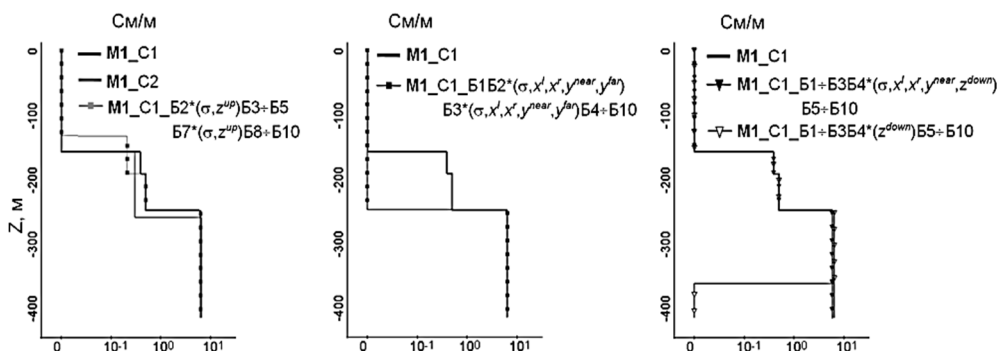


Рис. 6. Графики электропроводности вдоль скважины **244** для эквивалентных моделей (показаны только те эквивалентные модели, графики которых отличаются друг от друга по этой скважине)

Fig. 6. Conductivity plots along well 244 for equivalent models (only those equivalent models whose plots differ from each other for this well are shown)

Стоит отметить, что по критерию проводки скважин полученные эквивалентные модели достаточно близки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ эквивалентности для полученной в результате 3D-инверсии геоэлектрической модели показал, что основная эквивалентность связана с размерами блоков между полетными линиями. Она возникает в основном из-за того, что расстояние между полетными линиями составляет около 200 м. При этом для большинства блоков эквивалентные модели характеризуются уменьшением размера блоков между профилями за счет увеличения их размера вдоль полетной линии и изменения сопротивления. Поэтому при проведении 3D-инверсии по полной модели положения границ блоков локальных структур между полетными линиями (т. е. в направлении оси Y) были зафиксированы. Еще одна эквивалентность связана со слабой чувствительностью к положению нижней кромки нижних проводящих блоков. Остальные параметры структуры для рассмотренной системы наблюдений определяются достаточно надежно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scholl C., Neumann J., Watts M.D. Geo-steered 3D inversion of airborne electromagnetic data in rugged terrain // First European Airborne Electromagnetics Conference. – Turin, 2015. – P. 1–5. – DOI: 10.3997/2214-4609.201413864.
2. Christensen N. Resolution attributes for geophysical inversion models: Depth of investigation and novel measures // Near Surface Geophysics. – 2021. – Vol. 20. – P. 3–15. – DOI: 10.1002/nsg.12188.
3. Christensen N., Lawrie K. Resolution analyses for selecting an appropriate airborne electromagnetic (AEM) system // Exploration Geophysics. – 2012. – Vol. 43. – P. 213–227. – DOI: 10.1071/EG12005.
4. Rapid approximate inversion of airborne TEM / P. Fullagar, G. Pears, J. Reid, R. Schaa // Exploration Geophysics. – 2015. – Vol. 46. – P. 112–117. – DOI: 10.1071/EG14046.

5. Hansen T., Minsley B. Inversion of airborne EM data with an explicit choice of prior model // *Geophysical Journal International*. – 2019. – Vol. 218. – P. 1348–1366. – DOI: 10.1093/gji/ggz230.
6. Finite-element analysis of controlled-source electromagnetic induction using Coulomb-gauged potentials / E.A. Badea, M.E. Everett, G.A. Newman, O. Biro // *Geophysics*. – 2001. – Vol. 66 (3). – P. 786–799. – DOI: 10.1190/1.1444968.
7. Parallel 3-D marine controlled-source electromagnetic modelling using high-order tetrahedral Nedelec elements / O. Castillo-Reyes, J. de la Puente, L.E. Garcia-Castillo, J.M. Cela // *Geophysical Journal International*. – 2019. – Vol. 219 (1). – P. 39–65. – DOI: 10.1093/gji/ggz285.
8. Grayver A.V., Bürg M. Robust and scalable 3-D geo-electromagnetic modelling approach using the finite element method // *Geophysical Journal International*. – 2014. – Vol. 198 (1). – P. 110–125. – DOI: 10.1093/gji/ggu119.
9. Application of the marine circular electric dipole method in high latitude Arctic regions using drifting ice floes / V. Mogilatov, M. Goldman, M. Persova, Y. Soloveichik, Y. Koshkina, O. Trubacheva, A. Zlobinskiy // *Journal of Applied Geophysics*. – 2016. – Vol. 135. – P. 17–31. – DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.08.007.
10. Newman G.A., Alumbaugh D.L. Frequency-domain modelling of airborne electromagnetic responses using staggered finite differences // *Geophysical Prospecting*. – 1995. – Vol. 43 (8). – P. 1021–1042. – DOI: 10.1111/j.1365-2478.1995.tb00294.x.
11. Finite element solution to 3-D airborne time-domain electromagnetic problems in complex geological media using non-conforming hexahedral meshes / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, Y.I. Koshkina // *Journal of Applied Geophysics*. – 2019. – Vol. 172. – P. 103911. – DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.103911.
12. Efficient modeling of time-domain AEM using finite-volume method / X. Ren, C. Yin, Y. Liu, J. Cai, C. Wang, F. Ben // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2017. – Vol. 22 (3). – P. 267–278. – DOI: 10.2113/JEEG22.3.267.
13. Transient electromagnetic modelling of an isolated wire loop over a conductive medium / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, G.M. Trigubovich, D.V. Vagin, P.A. Domnikov // *Geophysical Prospecting*. – 2014. – Vol. 62 (5). – P. 1193–1201. – DOI: 10.1111/1365-2478.12122.
14. Improving the computational efficiency of solving multisource 3-D airborne electromagnetic problems in complex geological media / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, A.P. Sivenkova, A.M. Grif // *Computational Geosciences*. – 2021. – Vol. 25. – P. 1957–1981. – DOI: 10.1007/s10596-021-10095-6.
15. Тихонов А.Н. О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения // *Доклады АН СССР*. – 1965. – Т. 163, № 3. – С. 591–594.
16. Geometric 3-D inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to kimberlite pipes prospecting in a complex medium / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, G.M. Trigubovich, D.V. Vagin, A.M. Grif, D.S. Kiselev, A.P. Sivenkova // *Journal of Applied Geophysics*. – 2022. – Vol. 200. – P. 104611. – DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104611.
17. Three-dimensional inversion of airborne data with applications for detecting elongated sub-vertical bodies overlapped by an inhomogeneous conductive layer with topography / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, A.M. Grif, Y.I. Koshkina, A.P. Sivenkova // *Geophysical Prospecting*. – 2020. – Vol. 68 (7). – P. 2217–2253. – DOI: 10.1111/1365-2478.12979.
18. Oldenburg D.W., McGillivray P.R., Ellis R.G. Generalized subspace methods for large-scale inverse problems // *Geophysical Journal International*. – 1993. – Vol. 114 (1). – P. 12–20. – DOI: 10.1111/j.1365-246X.1993.tb01462.x.
19. Fleming D., Sidhu G. 2015 Diamond Drilling Assessment Report (MAW758 – Bigstone Project). – Vancouver: Foran Mining Corporation, 2015. – 309 p. – URL: <http://mineral-assessment.saskatchewan.ca> (accessed: 04.06.2024).
20. New airborne geophysical surveys in the Creighton–Flin Flon area / O. Mahmoodi, R.O. Maxeiner, R. Morelli, O. Boulanger // *Summary of Investigations 2018*. Vol. 2. Saskatchewan Geological Survey: Miscellaneous Report 2018-4.2. – Saskatchewan Ministry of Energy and Resources, 2018. – Paper A-7. – DOI: 10.13140/RG.2.2.23861.01762.

Сивенкова Анастасия Павловна, аспирант кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – численное моделирование задач, описываемых уравнениями математической физики. Имеет 26 печатных работ. E-mail: sivenkova.2014@stud.nstu.ru

Sivenkova Anastasia P., post-graduate student department of applied mathematics, NSTU. Her research interests include numerical modeling of problems described by the equations of mathematical physics. She has 26 publications and teaching manuals. E-mail: sivenkova.2014@stud.nstu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2024-2-69-84

Analysis of the equivalence of three-dimensional models in 3D-interpretation of aerial electrical survey data *

A.P. SIVENKOVA

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

sivenkova.2014@stud.nstu.ru

Abstract

The article is devoted to the problem of the equivalence of three-dimensional geoelectric models obtained as a result of 3D-interpretation of aerial electrical survey data in medium where local conductive bodies are covered by a heterogeneous near-surface layer. To carry out the research, we used data from aerial electrical prospecting carried out in the Creighton area (Canada) when searching for polymetallic ores. A two-stage 3D-inversion was used to build the geoelectric model. The purpose of the first stage of 3D-inversion was to reconstruct near-surface structures based on survey data obtained at the early times. The second stage of 3D-inversion was based on the residual map constructed from the practical signals and the signals obtained after the first stage of 3D-inversion at later times. Using the residual map, the starting positions of local bodies under the overlying layer were specified, and their geometry and properties were obtained during local 3D-inversions. Based on the results of 3D-inversion, a local conductive body was identified and confirmed by drilling data. An equivalence analysis was carried out for a three-dimensional model of this body. Various options for initial models differing in the number of blocks describing the body were considered, as well as options for changing the size of blocks in the model obtained as a result of 3D-inversion. It was found that the main equivalence is related to the large distance between flight lines, which is several times greater than the distance between positions on the profile. Therefore, most equivalent models are characterized by a decrease in the size of blocks in the direction orthogonal to the profiles, due to an increase in their size along the profile and a change in resistivity. At the same time, according to the criterion for drilling wells, the resulting equivalent models were identical, i.e. from a geological point of view, no fundamental difference was found between the resulting equivalent models.

Keywords: airborne geophysics, airborne electrical prospecting, three-dimensional inverse problems, 3D-interpretation, equivalence analysis, solid minerals, 3D-numerical modeling, electromagnetic field

* Received 01 February 2024.

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Research Laboratory "Modeling and data processing of high technologies", the project code is FSUN-2024-0003).

REFERENCES

1. Scholl C., Neumann J., Watts M.D. Geo-steered 3D inversion of airborne electromagnetic data in rugged terrain. *First European Airborne Electromagnetics Conference*, Turin, 2015, pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201413864.
2. Christensen N. Resolution attributes for geophysical inversion models: Depth of investigation and novel measures. *Near Surface Geophysics*, 2021, vol. 20, pp. 3–15. DOI: 10.1002/nsg.12188.
3. Christensen N., Lawrie K. Resolution analyses for selecting an appropriate airborne electromagnetic (AEM) system. *Exploration Geophysics*, 2012, vol. 43, pp. 213–227. DOI: 10.1071/EG12005.
4. Fullagar P., Pears G., Reid J., Schaa R. Rapid approximate inversion of airborne TEM. *Exploration Geophysics*, 2015, vol. 46, pp. 112–117. DOI: 10.1071/EG14046.
5. Hansen T., Minsley B. Inversion of airborne EM data with an explicit choice of prior model. *Geophysical Journal International*, 2019, vol. 218, pp. 1348–1366. DOI: 10.1093/gji/ggz230.
6. Badea E.A., Everett M.E., Newman G.A., Biro O. Finite-element analysis of controlled-source electromagnetic induction using Coulomb-gauged potentials. *Geophysics*, 2001, vol. 66 (3), pp. 786–799. DOI: 10.1190/1.1444968.
7. Castillo-Reyes O., De la Puente J., Garcia-Castillo L.E., Cela J.M. Parallel 3-D marine controlled-source electromagnetic modelling using high-order tetrahedral Nedelec elements. *Geophysical Journal International*, 2019, vol. 219 (1), pp. 39–65. DOI: 10.1093/gji/ggz285.
8. Grayver A.V., Bürg M. Robust and scalable 3-D geo-electromagnetic modelling approach using the finite element method. *Geophysical Journal International*, 2014, vol. 198 (1), pp. 110–125. DOI: 10.1093/gji/ggu119.
9. Mogilatov V., Goldman M., Persova M., Soloveichik Y., Koshkina Y., Trubacheva O., Zlobinskiy A. Application of the marine circular electric dipole method in high latitude Arctic regions using drifting ice floes. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, vol. 135, pp. 17–31. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.08.007.
10. Newman G.A., Alumbaugh D.L. Frequency-domain modelling of airborne electromagnetic responses using staggered finite differences. *Geophysical Prospecting*, 1995, vol. 43 (8), pp. 1021–1042. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1995.tb00294.x.
11. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Kiselev D.S., Koshkina Y.I. Finite element solution to 3-D airborne time-domain electromagnetic problems in complex geological media using non-conforming hexahedral meshes. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, vol. 172, p. 103911. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.103911.
12. Ren X., Yin C., Liu Y., Cai J., Wang C., Ben F. Efficient modeling of time-domain AEM using finite-volume method. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2017, vol. 22 (3), pp. 267–278. DOI: 10.2113/JEEG22.3.267.
13. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Trigubovich G.M., Vagin D.V., Domnikov P.A. Transient electromagnetic modelling of an isolated wire loop over a conductive medium. *Geophysical Prospecting*, 2014, vol. 62 (5), pp. 1193–1201. DOI: 10.1111/1365-2478.12122.
14. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Kiselev D.S., Sivenkova A.P., Grif A.M. Improving the computational efficiency of solving multisource 3-D airborne electromagnetic problems in complex geological media. *Computational Geosciences*, 2021, vol. 25, pp. 1957–1981. DOI: 10.1007/s10596-021-10095-6.
15. Tikhonov A.N. O nekorrektnykh zadachakh lineinoi algebry i ustoichivom metode ikh resheniya [On incorrect problems of linear algebra and a stable method for their solution]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1965, vol. 163, no. 3, pp. 591–594. (In Russian).
16. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Trigubovich G.M., Vagin D.V., Grif A.M., Kiselev D.S., Sivenkova A.P. Geometric 3-D inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to kimberlite pipes prospecting in a complex medium. *Journal of Applied Geophysics*, 2022, vol. 200, p. 104611. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104611.
17. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Kiselev D.S., Grif A.M., Koshkina Y.I., Sivenkova A.P. Three-dimensional inversion of airborne data with applications for detecting elongated subvertical bodies overlapped by an inhomogeneous conductive layer with topography. *Geophysical Prospecting*, 2020, vol. 68 (7), pp. 2217–2253. DOI: 10.1111/1365-2478.12979.

18. Oldenburg D.W., McGillivray P.R., Ellis R.G. Generalized subspace methods for large-scale inverse problems. *Geophysical Journal International*, 1993, vol. 114 (1), pp. 12–20. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1993.tb01462.x.

19. Fleming D., Sidhu G. *2015 Diamond Drilling Assessment Report (MAW758 – Bigstone Project)*. Vancouver, Foran Mining Corporation, 2015. 309 p. Available at: <http://mineral-assessment.saskatchewan.ca> (accessed 04.06.2024).

20. Mahmoodi O., Maxeiner R.O., Morelli R., Boulanger O. New airborne geophysical surveys in the Creighton–Flin Flon area. *Summary of Investigations 2018. Vol. 2. Saskatchewan Geological Survey*. Miscellaneous Report 2018-4.2. Saskatchewan Ministry of Energy and Resources, 2018, paper A-7. DOI: 10.13140/RG.2.2.23861.01762.

Для цитирования:

Сивенкова А.П. Анализ эквивалентности трехмерных моделей при 3D-интерпретации данных аэроэлектроразведки // Системы анализа и обработки данных. – 2024. – № 2 (94). – С. 69–84. – DOI: 10.17212/2782-2001-2024-2-69-84.

For citation:

Sivenkova A.P. Analiz ekvivalentnosti trekhmernykh modelei pri 3D-interpretatsii dannykh aéroelektorazvedki [Analysis of the equivalence of three-dimensional models in 3D interpretation of aerial electrical survey data]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2024, no. 2 (94), pp. 69–84. DOI: 10.17212/2782-2001-2024-2-69-84.