



Научная статья

УДК 550.837.6

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-137-151>



Особенности инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований при нефтегазопроисловых исследованиях на территории Непско-Ботубобинской антеклизы

Екатерина Викторовна Мурзина^а, Александр Валентинович Поспеев^б,
Игорь Константинович Семинский^с, Игорь Владимирович Буддо^д,
Дарья Борисовна Немцева^е, Вячеслав Сергеевич Емельянов^ф,
Юрий Александрович Агафонов^г

^{а-е}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

^дИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^{а,с-г}ООО «СИГМА-ГЕО», г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Мурзина Екатерина Викторовна, mkv@sigma-geo.ru

Резюме. Данные нестационарных электромагнитных зондирований становлением поля в ближней зоне, широко применяемых для решения нефтегазопроисловых задач на Непско-Ботубобинской антеклизе, чаще всего интерпретируются в рамках горизонтально-слоистых моделей сред. Целью данного исследования являлась разработка подхода к инверсии кривых электромагнитных зондирований, полученных с использованием высокоплотных 3D-сетей наблюдений. В основу исследования легло математическое моделирование, результаты которого позволили оценить латеральные пространственные параметры нестационарного электромагнитного поля и понять отличия результатов одномерной инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне относительно истинных параметров целевого горизонта. В результате была получена характеристика электромагнитного поля, которая описывается экспоненциальной функцией и применяется при латеральной закреплённой инверсии высокоплотных электромагнитных зондирований становлением поля в ближней зоне. Предлагаемый подход протестирован на практических данных в пределах участка исследований, расположенного на склоне Непско-Ботубобинской антеклизы. Показано, что использование пространственной невязки при инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне позволяет получать геоэлектрические модели, характеризующиеся латеральной выдержанностью геоэлектрических параметров разреза. Применение подхода, основанного на методике пространственного накопления в процессе инверсии, позволяет повысить устойчивость решения обратной задачи данных зондирования становлением поля в ближней зоне.

Ключевые слова: Непско-Ботубобинская антеклиза, зондирования становлением поля в ближней зоне, инверсия, квазигоризонтально-слоистая модель, пространственная невязка, удельное электрическое сопротивление

Благодарности: Авторы благодарят исполнительного директора ООО «СИГМА-ГЕО» М. В. Шарлова за всестороннюю поддержку в исследовательской деятельности и возможность использования данных зондирования становлением поля в ближней зоне.

Для цитирования: Мурзина Е. В., Поспеев А. В., Семинский И. К., Буддо И. В., Немцева Д. Б., Емельянов В. С., Агафонов Ю. А. Особенности инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований при нефтегазопроисловых исследованиях на территории Непско-Ботубобинской антеклизы // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 137–151. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-137-151>.

Original article

Features of high-density transient electromagnetic sounding data inversion under oil and gas prospecting in the Nepa-Botuoba antecline area

Ekaterina V. Murzina^а, Alexandr V. Pospeev^б, Igor K. Seminskiy^с, Igor V. Buddo^д,
Daria B. Nemtseva^е, Vyacheslav S. Emelianov^ф, Yuri A. Agafonov^г

^{а-е}Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

^дIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{а,с-г}LLC SIGMA-GEO, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Ekaterina V. Murzina, mkv@sigma-geo.ru

© Мурзина Е. В., Поспеев А. В., Семинский И. К., Буддо И. В., Немцева Д. Б., Емельянов В. С., Агафонов Ю. А., 2022



Abstract. The data of near-field transient electromagnetic sounding, which are widely used for the purposes of oil and gas exploration within the Nepa-Botuoba antecline, are typically interpreted in terms of quasi-horizontally-layered models of media. The purpose of this study is to develop an approach to the inversion of transient electromagnetic sounding curves obtained via high-density 3D observation networks. The study was based on mathematical modeling, whose results allowed to estimate the lateral spatial parameters of a non-stationary electromagnetic field as well as to understand the differences between the results of one-dimensional inversion of the transient electromagnetic sounding data and the true parameters of the target horizon. As a result, the characteristic of the electromagnetic field described by an exponential function and used in the lateral-constraint inversion of high-density electromagnetic sounding was obtained. The proposed approach was tested on the practical data within the site under investigation located on the slope of the Nepa-Botuoba antecline. It is shown that the use of spatial discrepancy under TEM sounding data inversion makes it possible to obtain geoelectric models characterized by lateral consistency of section geoelectric parameters. The application of the spatial stacking-based approach in the inversion process allows to increase the solution stability of the inverse problem of the near-field TEM sounding data.

Keywords: Nepa-Botuoba antecline, near-field transient electromagnetic (TEM) sounding, inversion, quasi-horizontal layered model, spatial discrepancy, electrical resistivity

Acknowledgements: The authors thank M. V. Sharlov, the Executive Director of LLC SIGMA-GEO for the extensive support of the research and provided possibility to use the materials of near-field transient electromagnetic sounding.

For citation: Murzina E. V., Pospeev A. V., Seminskiy I. K., Buddo I. V., Nemtseva D. B., Emelianov V. S., Agafonov Y. A. Features of high-density transient electromagnetic sounding data inversion under oil and gas prospecting in the Nepa-Botuoba antecline area. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(2):137-151. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-137-151>.

Введение

Сложное геологическое строение нефтегазоносных комплексов юга Сибирской платформы, отражающееся в слабой роли структурного фактора в локализации месторождений углеводородов, побуждает исследователей рассматривать задачу непосредственного картирования зон коллекторов в качестве первоочередной. Это предопределяет необходимость развития современных динамических методов анализа сейсмических материалов [1], а также использования несейсмических методов, прежде всего нестационарных электромагнитных зондирований. Геологическая эффективность применения электромагнитных зондирований обусловлена соответствующими петрофизическими характеристиками горизонтов-коллекторов, являющихся контрастными объектами для картирования их электроразведкой. Все вышеперечисленные факторы подтолкнули к разработке методик совмещенных высокоплотных 3D-сетей наблюдений сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ-3D) и зондирований становлением поля в ближней зоне, выполненных по плотной сети наблюдений (ЗСБ-3D).

На сегодняшний день метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) является одним из наиболее часто применяемых методов электроразведки при решении

нефтегазопроисковых задач на юге Сибирской платформы. Принцип зондирования прост: в генераторную петлю (источник электромагнитного поля) подается токовый импульс, порождающий магнитное поле, вследствие затухания которого в зондируемом пространстве индуцируются вихревые токи, распространяющиеся от дневной поверхности в глубину со скоростью, пропорциональной удельной электропроводности вмещающей среды. Затухание вихревых токов, в свою очередь, инициирует вторичное магнитное поле, затухание которого регистрируется на зажимах приемных контуров в виде спада электродвижущей силы. Для удобства интерпретации рассчитываются трансформации кривой электродвижущей силы – кривые кажущегося сопротивления $\rho_T(t)$ и кажущейся проводимости $St(Ht)$ [2, 3].

Совокупность таких факторов, как переход к решению задач в сложных геолого-геофизических условиях, а также значительное удорожание поисково-разведочного бурения, в настоящее время является причиной очень острой постановки вопроса повышения эффективности геофизического сопровождения геологоразведочного процесса, из чего закономерно вытекает необходимость в усовершенствовании программного комплекса. Физическое увеличение объема получаемой электромагнитной информации требует соот-



ветствующего совершенствования аппарата инверсии. Использование «ручного» подбора моделей влечет существенные затраты времени; кроме того, в силу субъективизма интерпретаторов трудно обеспечить необходимое качество получаемых геоэлектрических моделей. Необходимость ускорения и унификации процесса инверсии данных ЗСБ-3D, а также минимизации субъективных факторов побуждает к разработке и внедрению методики автоматической инверсии данных и ее адаптации под поставленные задачи.

Неединственность решения обратной задачи геофизики [4, 5] применительно к инверсии данных ЗСБ-3D требует использования способов регуляризации решения [6, 7], а также оптимизации подходов к инверсии в зависимости от размерности геоэлектрического пространства [7, 8]. В геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы при незначительном контрасте параметров разреза основной методикой инверсии данных ЗСБ является интерпретация в рамках квазигоризонтально-слоистой модели [9–11]. При этом инверсия каждой кривой ЗСБ производится отдельно, а в качестве стартового приближения используется модель, полученная для соседнего зондирования. В случае производства работ по высокоплотной сети наблюдений подобный подход приводит к появлению ложной дифференцированности геоэлектрических параметров средней и нижней частей разреза, не соответствующей разрешающей способности электромагнитных методов.

Существуют различные способы регуляризации обратной задачи. Например, с целью обеспечения латеральной выдержанности квазигоризонтально-слоистой среды задаются ограничения для модельных данных при помощи ковариационной матрицы шероховатости, которая применяется к вектору параметров модели [12, 13]. Данный подход называется латеральной закрепленной инверсией (*англ.*: lateral constrained inversion, LCI) [12–14]. При применении подхода по данным априорной информации закрепляется глубина и в рамках закрепленной модели происходит вариация геоэлектрических параметров. В данной статье авторы освещают результат применения пространственного

накопления в процессе инверсии данных ЗСБ в пределах радиуса влияния от целевого объекта исследований на примере разреза юго-восточного склона Непского свода.

Материалы и методы исследования

Физико-геологическая модель объекта исследования. Согласно карте тектонического районирования, исследуемый участок располагается в пределах Непского свода, являющегося крупнейшим структурным элементом Непско-Ботуобинской антеклизы (рис. 1) [15]. Непско-Ботуобинская антеклиза является надпорядковой структурой Сибирской платформы, расположена в юго-восточной части данной платформы и имеет размеры 850×350 км, амплитуду порядка 1000 м и площадь около 235 тыс. км².

В платформенном чехле рассматриваемой территории по структурно-тектоническим и литологическим признакам выделяется три комплекса: подсолевой (рифей-венд-нижнекембрийский), соленосный (нижнекембрийский) и надсолевой (представленный отложениями ниже-средне-верхнекембрийского, ордовикского, юрского возрастов). Толщина осадочного чехла на территории исследования варьирует от 1667 до 1816 м.

Подсолевой комплекс включает в себя терригенно-карбонатные отложения непской, тирской, катангской, собинской, тэтэрской свит и осинского горизонта усольской свиты. С подсолевым комплексом осадочного чехла связаны основные перспективы нефтегазоносности. В пределах комплекса расположены карбонатные (осинский, усть-кутский, преображенский) и терригенные (верхнечонский) нефтегазоносные горизонты. Эти горизонты занимают различное гипсометрическое положение, но обладают сходным структурным планом.

Отложения подсолевого комплекса стратиграфически связаны с карбонатными и терригенными отложениями венда и нижнего кембрия. С учетом разрешающей способности практических кривых ЗСБ и данных глубокого бурения скважин (геофизического исследования скважин) подсолевой комплекс может быть подразделен на три подгоризонта

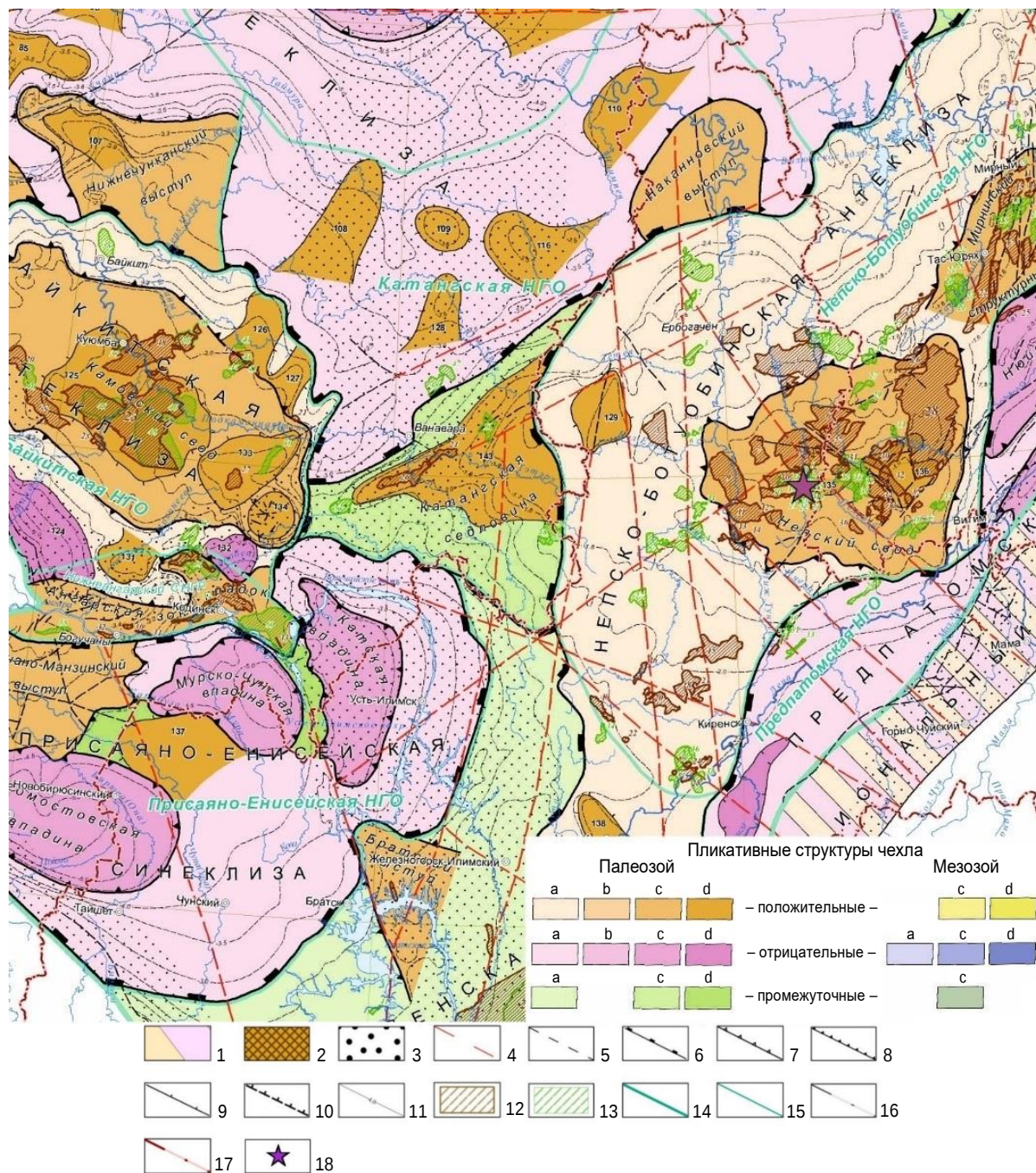


Рис. 1. Схематическая карта основных тектонических структур юга Сибирской платформы (по В. С. Старосельцеву, 2018):

1 – зона складчато-надвиговых дислокаций; 2 – выходы кристаллического фундамента; 3 – зоны интенсивного рифейского прогибания; 4 – региональные глубинные разломы; 5 – разрывы, установленные геологической съемкой, сейсморазведкой и подтвержденные бурением; 6–10 – контуры: 6 – надпорядковых структур, 7 – суперпорядковых структур, 8 – структур первого порядка, 9 – структур второго порядка, 10 – предполагаемые выделения; 11 – стратоезогипсы венда – кембрия; 12 – месторождения углеводородов; 13 – подготовленные месторождения; 14, 15 – нефтегеологическое районирование; 16, 17 – государственные границы субъектов Российской Федерации; 18 – местоположение участка исследования

Fig. 1. Schematic map of the main tectonic structures

in the south of the Siberian platform (according to V. S. Staroseltsev, 2018):

1 – zone of fold-thrust dislocations; 2 – outcrops of the crystalline basement; 3 – zones of intensive Riphean subsidence; 4 – regional deep faults; 5 – discontinuities established by a geological survey, seismic survey, and confirmed by drilling; 6–10 – the contours of: 6 – supra-order structures, 7 – superorder structures, 8 – first order structures, 9 – second order structures, 10 – anticipated allocations; 11 – Vendian – Cambrian structure contours; 12 – hydrocarbon deposits; 13 – developed fields; 14, 15 – oil field geological zoning; 16, 17 – state borders of the regions of the Russian Federation; 18 – location of the site under investigation



с разными геоэлектрическими характеристиками. Верхний подгоризонт включает карбонатные отложения осинского и усть-кутского горизонтов и отличается пониженным продольным сопротивлением (десятки Ом·м) лишь при улучшении их коллекторских свойств. Средний подгоризонт сложен карбонатными породами собинской, тэтэрской свит и обладает продольным сопротивлением в первые сотни Ом·м. Нижний же подгоризонт, являющийся целевым объектом исследований, объединяет преображенский пласт, терригенные породы чорской свиты и кору выветривания и характеризуется диапазоном продольного сопротивления 16–200 Ом·м.

Соленосный комплекс включает отложения литвинцевской, ангарской, булайской, бельской и усольской свит среднего и нижнего кембрия. Суммарная толщина комплекса составляет 1100–1200 м, при этом для него характерно переслаивание пластов солей и карбонатов. Поскольку удельное электрическое сопротивление (УЭС) солей крайне велико, его величина применительно к отложениям карбонатно-галогенного комплекса в основном определяется поведением карбонатной части разреза, в частности наличием в его пределах ряда региональных флюидонасыщенных зон коллекторов. Таким образом, максимальное УЭС горизонтов карбонатно-галогенного комплекса достигает 300–500 Ом·м, а минимальное снижается до первых десятков Ом·м.

В геоэлектрическом плане наиболее контрастным является надсолевой комплекс осадочного чехла, объединяющий отложения среднего – верхнего кембрия (верхоленская, илгинская свиты), а также юрские и четвертичные отложения. Пониженные УЭС (до 20–80 Ом·м) связаны с наличием водонасыщенных горизонтов-коллекторов в отложениях юры и верхнего кембрия (таблица).

Породы кристаллического фундамента являются основным опорным горизонтом, который обладает высоким УЭС, как правило, превышающим 1000 Ом·м.

Таким образом, разрез осадочного чехла сложен породами, различающимися по продольному сопротивлению, что является благоприятным фактором для изучения методом ЗСБ. Корреляция геоэлектрических и коллекторских свойств горных пород дает возможность изучать зоны распространения коллекторов во всех интервалах разреза.

Методика расчета весовой функции для инверсии данных высокоплотных зондирования. При решении обратной задачи средствами одномерной интерпретации для точной оценки геоэлектрических параметров важно учитывать, какой объем зондируемого пространства в целом занимают вихревые токи при проникновении в исследуемую среду (квазигоризонтально-слоистый разрез) [16]. Если разрез сложен горизонтально залегающими слоями, в поздней стадии вихревые токи в нижнем полупространстве распростра-

Физико-геологическая модель территории исследований Physico-geological model of the area under investigation

Номер слоя	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Мощность, м	Геологическое описание
1	170	140	Юрские отложения, J
2	200	250	Илгинская, верхоленская свиты, ϵ_3
3	150	300	Литвинцевская свита, ϵ_{1-2}
4	300	200	Ангарская свита, ϵ_1
5	50	250	Бельско-булайский комплекс, ϵ_1
6	300	400	Усольская свита, ϵ_1
7	150	100	Осинский и усть-кутский горизонты, ϵ_1
8	80	120	Собинская, тэтэрская свиты, ϵ_1
9	45	100	Катангская, чорская свиты и кора выветривания, V- ϵ_1
10	2000	Н. о.	Архейский фундамент

Примечание. Н. о. – мощность не определена.

Note. Н. о. – thickness is not determined.



няются равномерно. Однако, когда вихревые токи достигают неоднородности или несогласно залегающих слоев, их равномерное распределение нарушается, вследствие чего сигнал электродвижущей силы, регистрируемый на зажимах приемной петли, осложняется влиянием объекта [16].

Исследования выполнялись с помощью цифровой телеметрической электроразведочной станции SGS-TEM [17] по регулярной плотной сети шестиразносными установками (две соосные петли (Qq) и четыре разнесенные (Q-q)). Источником нестационарного поля являлась генераторная петля размером 600×600 м, в которую подавался ток до 250 А; приемные петли размером 18×18 м располагались на удалении 140, 500, 900 м от центра источника.

Применительно к конкретным геоэлектрическим условиям объем распространения вторичного электромагнитного поля возможно оценить с помощью трехмерного математического моделирования. Для этого были проведены соответствующие математические расчеты с использованием программы GEO-EM [18].

Расчеты синтетических кривых ЗСБ проводились для установок зондирования, наиболее часто применяемых в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы (рис. 2, а). Инверсия модельных данных производилась с помощью модуля автоматической одномерной инверсии Model4 [19], разработанного на базе Model3 [20], встроенного в программный комплекс SGS-TEM [17].

В качестве референтной использовалась геоэлектрическая модель, по проводимости надсолевого, карбонатно-галогенного и подсолевого комплексов близкая к типичной геоэлектрической модели для Непско-Ботубинской антеклизы (см. таблицу).

Далее при помощи программы GEO-EM [18] были рассчитаны переходные характеристики от среды без объекта с УЭС подсолевого комплекса слоя $\rho_1 = 23 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (см. рис. 2, таблицу), в которую помещен относительно контрастный по геоэлектрическим свойствам проводящий объект (коллектор $\rho_2 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Затем проводилось восстановление УЭС данного горизонта по модельным кривым в рамках закрепленного структурного каркаса.

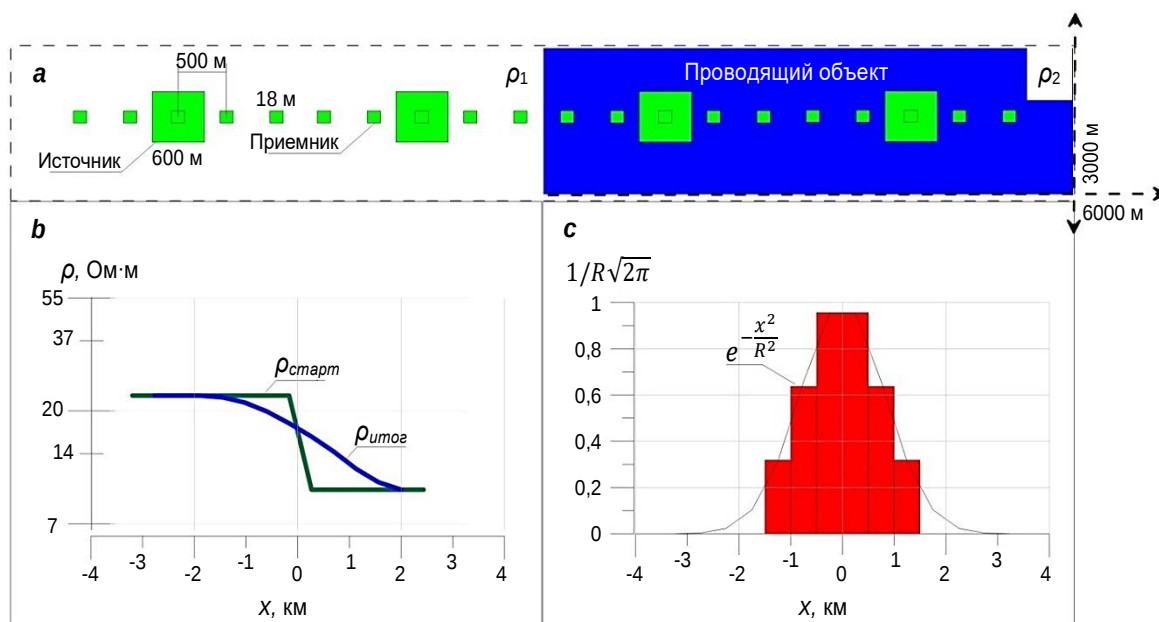


Рис. 2. Схема и результаты моделирования по профилю:

- а – схема профиля и положения токопроводящего объекта на глубине 1800 м;
- б – график исходного и восстановленного значений удельного электрического сопротивления;
- с – результат дифференцирования восстановленных значений удельного электрического сопротивления и расчета пространственного фильтра

Fig. 2. Diagram and modeling results by the profile:

- a – profile diagram and locations of a conducting object at the depth of 1800 m;
- b – graph of the initial and restored values of electrical resistivity;
- c – result of restored resistivity value differentiating and spatial filter calculation



По мере удаления от границы смены параметров подсолевого комплекса результаты инверсии приближаются к модельным и УЭС слоя определяется все более точно.

В результате 1D-инверсии синтетических кривых определено, что геоэлектрические параметры целевого горизонта восстанавливаются с минимальной ошибкой. График УЭС, определенных в результате инверсии, представляет собой результат сглаживания исходного графика УЭС модели и может быть представлен в виде свертки (1):

$$\log(\rho_{result}) = \log(\rho_{start}) * K_f, \quad (1)$$

где ρ_{result} , ρ_{start} – сглаженное и исходное УЭС; K_f – коэффициент фильтра.

Коэффициенты весового фильтра получены дифференцированием графика результата инверсии. Ширина полученного в результате расчета фильтра пропорциональна радиусу влияния неоднородности и примерно равна удвоенной глубине расположения целевого горизонта. Середина фильтра соответствует границе смены сред, а его коэффициенты довольно точно аппроксимируются гауссовой функцией (рис. 2, с).

При площадной инверсии данных размерность уравнения (1) увеличивается и фильтр становится двумерным и осесимметричным. На основании этого предложена методика, отличающаяся от обычной «поточечной» одномерной инверсии. При подборе модифицируется общее значение УЭС слоя для всех кривых ЗСБ, входящих в радиус исследований. Функционал невязки рассчитывается при этом с использованием весовой функции $W(R)$ (2):

$$W(R) = K_f = e^{-\frac{x^2}{R^2}}, \quad (2)$$

где x – расстояние между пунктами наблюдений; R – радиус влияния неоднородности, м.

Общая формула функционала (3):

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}}, \quad (3)$$

где δ_i – невязка между теоретической и практической кривыми i -й точки; n – количество точек в радиусе влияния неоднородности.

Поскольку ширина «зоны захвата» электромагнитного поля меняется в зависимости от глубины интерпретируемого слоя, значения сглаживающего фильтра рассчитываются

для каждого из них. Понятно, что эффективность пространственного сглаживания зависит от количества точек, входящих в радиус влияния. При использовании высокоплотных сетей наблюдений оно возрастает в квадрате по отношению к количеству точек на одной линии, что обеспечивает эффективность методики именно при инверсии данных ЗСБ-ЗД.

Для оценки эффективности методики использования пространственной невязки в ходе инверсии для типичных геологических условий юга Сибирской платформы проведено синтетическое моделирование. На модельной площади было размещено около ста точек зондирования по плотной 3D-сети наблюдений. Далее проводился расчет кривых ЗСБ в программном обеспечении GEO-EM [17] и инверсия в Model4 [19]. На каждую теоретическую кривую, рассчитанную для референтной модели, с включением неоднородности накладывался электромагнитный шум, характерный для исследуемой территории.

На рис. 3 показана модель исследований и сеть наблюдений, на рис. 4, 5 – результат поточечной инверсии и инверсии с использованием пространственной невязки.

В инверсии при восстановлении геоэлектрической модели участвовало четыре слоя, отличавшихся наибольшей эквивалентностью. Остальные слои модели не участвовали в инверсии и закреплялись. Проводящий слой IV восстанавливался достаточно устойчиво, в то время как горизонты, относящиеся к подсолевым отложениям (см. рис. 3, слои I–III), отличались высокой дисперсией получаемых моделей УЭС.

Таким образом, результаты синтетического моделирования показывают, что поточечная инверсия неизбежно приводит к формированию «пестрой» финальной модели за счет «переноса» погрешностей с кривых в разрез и высокой детализации разреза (см. рис. 5, a_i , a_{II} , a_{III}). Использование же пространственной невязки «распределяет» погрешности по всей совокупности кривых в радиусе исследований, что и формирует модель, гладкость которой соответствует эффективному разрешению электромагнитного поля на данной глубине, позволяя устойчиво и более точно восстановить модель (см. рис. 5, b_i , b_{II} , b_{III}).

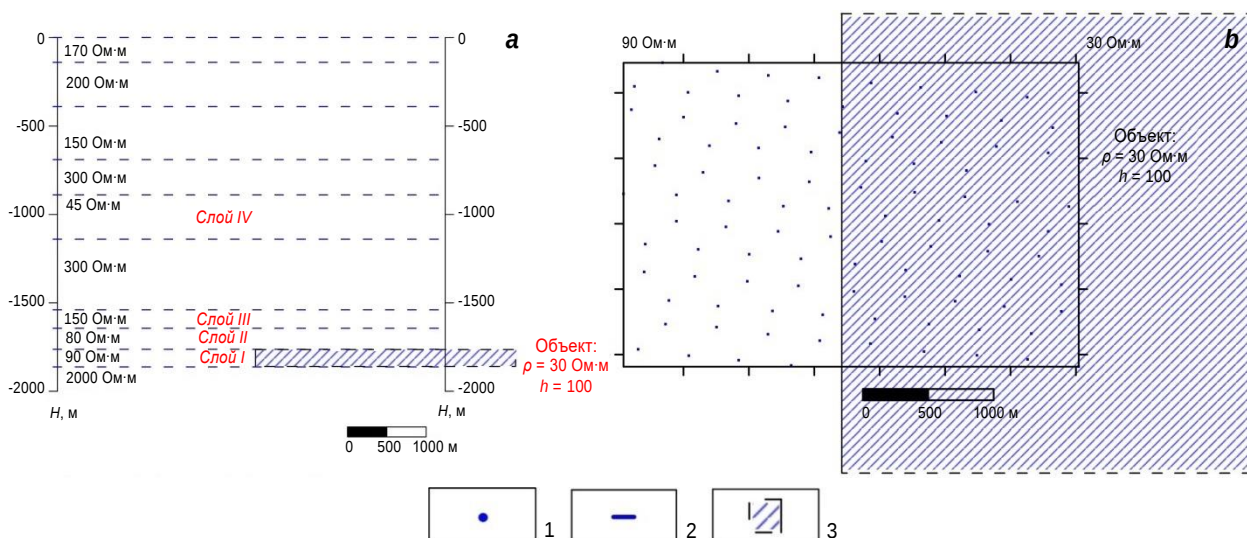


Рис. 3. Схема математического моделирования:

a – в разрезе; b – в плоскости

*1 – точки зондирования становлением поля в ближней зоне;
2 – границы геоэлектрических слоев; 3 – трехмерный объект*

Fig. 3. Diagram of mathematical modeling:

a – in section; b – in plane

*1 – points of the near-field transient electromagnetic sounding;
2 – boundaries of geoelectric layers; 3 – a three-dimensional object*

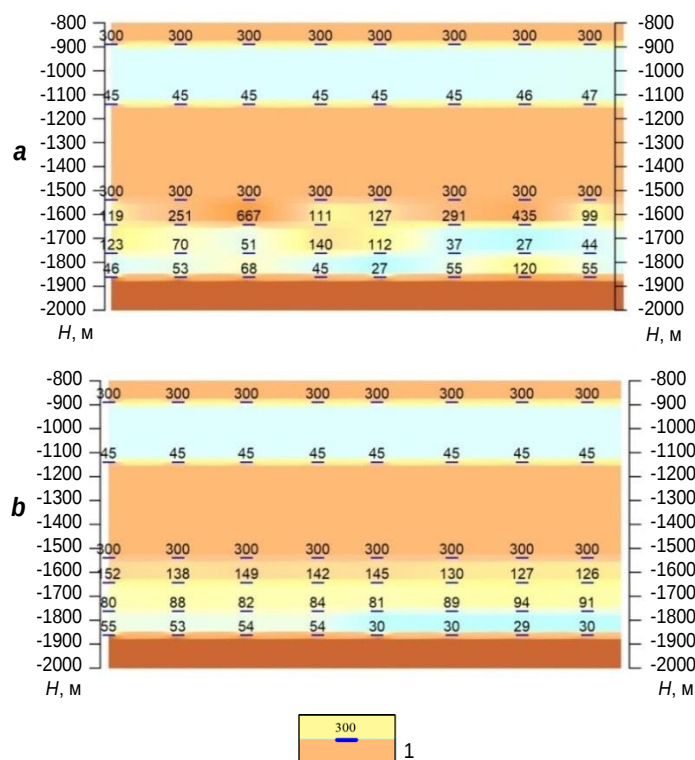


Рис. 4. Фрагменты геоэлектрических разрезов, полученные по результатам математического моделирования с применением:

a – поточечной инверсии; b – пространственной невязки

1 – границы геоэлектрических слоев

Fig. 4. Fragments of the geoelectric sections obtained from the results of mathematical modeling using:

a – point-wise inversion; b – spatial discrepancy

1 – boundaries of geoelectric layers

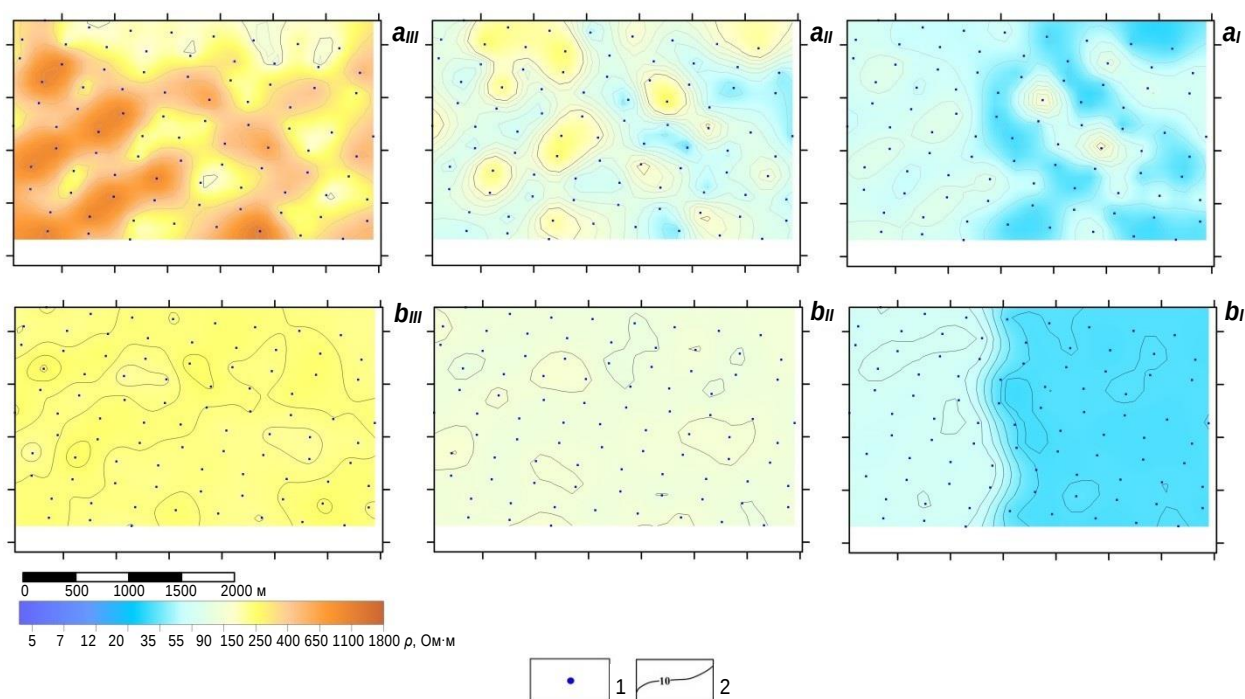


Рис. 5. Результаты математического моделирования:

- a* – карта удельного электрического сопротивления, полученная с применением поточечной инверсии;
b – карта удельного электрического сопротивления, полученная с применением пространственной невязки
 III – карта удельного электрического сопротивления отложений осинского и усть-кутского горизонтов, ϵ ;
 II – карта удельного электрического сопротивления отложений собинской, тэтэрской свит, ϵ_1 ;
 I – карта удельного электрического сопротивления катангской, чорской свиты и коры выветривания, $V-\epsilon_1$
 1 – точки зондирования становлением поля в ближней зоне;
 2 – изолинии удельного электрического сопротивления

Fig. 5. Mathematical modeling results:

- a* – electrical resistivity map obtained by point-wise inversion; *b* – electrical resistivity map obtained using spatial discrepancy
 III – electrical resistivity map of the sediments of the Osinsky and Ust-Kutsky horizons, ϵ ;
 II – electrical resistivity map of the sediments of the Sobino and Teter formations, ϵ_1 ;
 I – electrical resistivity map of the sediments of the Katanga, Chora formations and weathering crust, $V-\epsilon_1$
 1 – points of near-field transient electromagnetic sounding; 2 – electrical resistivity contours

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве примера приведен результат интерпретации данных ЗСБ (рис. 6), выполненных на одной из площадей Непско-Ботубинской антеклизы, в пределах Непского свода. Работы методом ЗСБ выполнялись по высокоплотной сети наблюдений (10 ф. н. на 1 км²). Инверсия проводилась в рамках закрепленного структурного каркаса по данным сейсморазведки МОГТ-3D. Детализация структурного каркаса выполнялась в соответствии с данными бурения скважин и МОГТ-3D.

В первом и во втором случае отмечено, что полученные по результату решения обратной задачи невязки близки (см. рис. 6, *b_I*, *b_{II}*) и в большей степени связаны с качеством полевого материала в некоторых участках присутствия осложненных кривых ЗСБ (где

невязка более 2 %). Чрезмерная детализация разреза приводит к повышению эквивалентности между смежными слоями, ввиду чего в рамках схожих значений невязок могут быть построены абсолютно разные модели УЭС (см. рис. 6, *a_I*, *a_{II}*). На карте УЭС, полученной в результате применения поточечной инверсии (см. рис. 6, *a_I*), отмечена высокая дисперсия УЭС, которая отражает в большей степени качество полевого материала (присутствие локальных «выскоков» в местах осложнения кривых ЗСБ). Вследствие применения разработанной методики осложняющие интерпретацию эффекты полностью устраняются (см. рис. 6, *a_{II}*). Прослеживается зональность геоэлектрических аномалий по площади. Единый подход к инверсии данных значительно снижает вероятность возникновения единичных локальных «выскоков», которые наблюдаются

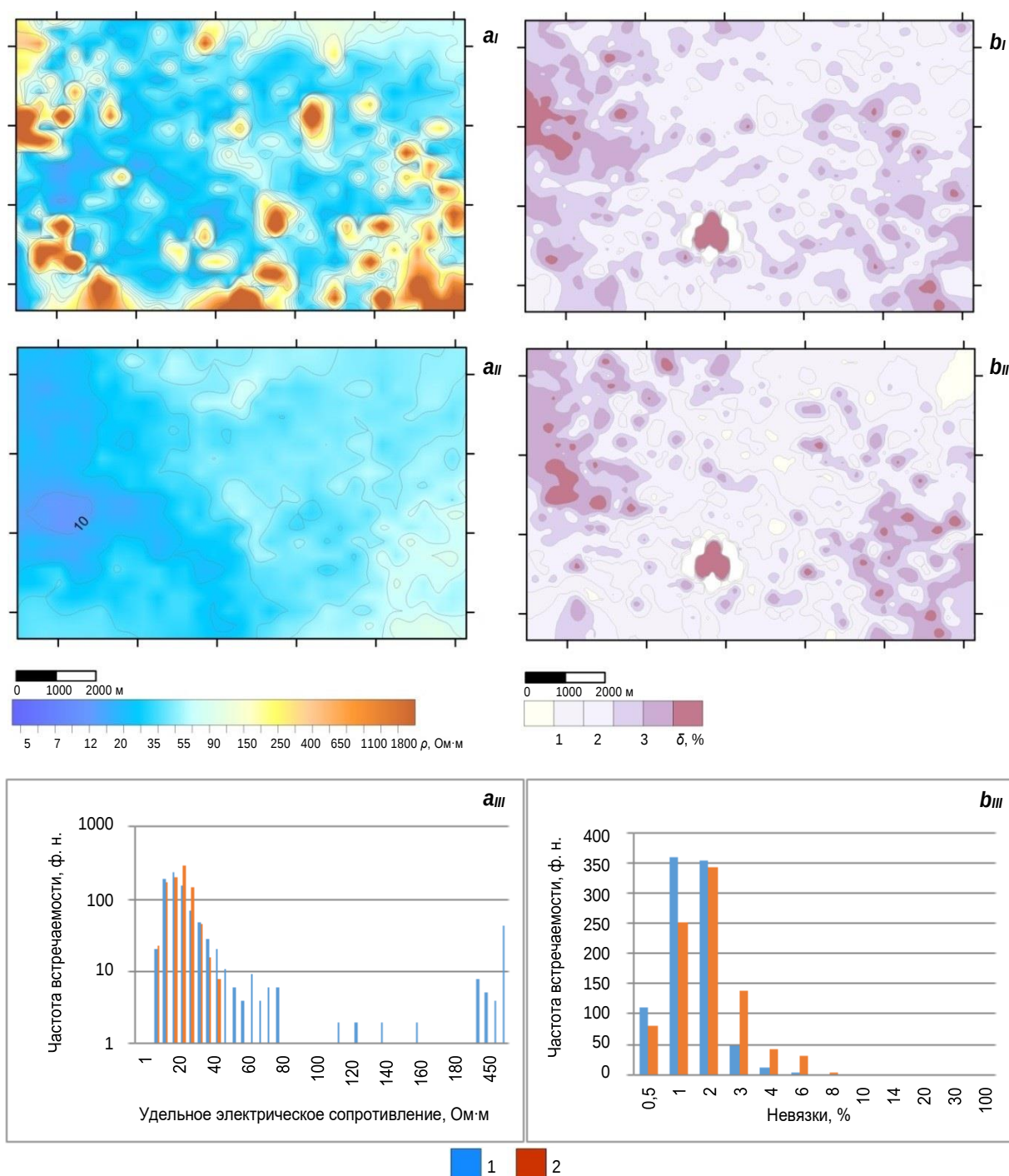


Рис. 6. Результат поточечной инверсии и инверсии с применением пространственной невязки:

a_I, a_{II} – карты удельного электрического сопротивления и невязок поточечной инверсии кривых зондирования становлением поля в ближней зоне; a_{III} – сравнение распределений удельного электрического сопротивления при поточечной инверсии и при инверсии с пространственной невязкой; b_I, b_{II} – карты удельного электрического сопротивления и невязок инверсии кривых зондирования становлением поля в ближней зоне с применением пространственной невязки; b_{III} – сравнение распределений невязок при поточечной инверсии и при инверсии с пространственной невязкой

1 – поточечная инверсия; 2 – инверсия с применением пространственной невязки

Fig. 6. The result of the point-wise inversion and inversion using spatial discrepancy:

a_I, a_{II} – maps of electrical resistivity and point-wise inversion misfit of the near-field transient electromagnetic sounding curves; a_{III} – comparison of electrical resistivity distributions under point-wise inversion and inversion with spatial discrepancy; b_I, b_{II} – maps of electrical resistivity and inversion misfit of the near-field transient electromagnetic sounding curves using spatial discrepancy; b_{III} – comparison of misfit distributions under point-wise inversion and inversion with spatial discrepancy

1 – point-wise inversion; 2 – inversion using spatial discrepancy



при применении поточечной инверсии, позволяя уменьшить влияние дисперсии на «хвостах» кривых ЗСБ.

Наиболее наглядно оценить и сравнить полученные результаты позволяет построение диаграмм распределений УЭС и невязок (см. рис. 6, a_{III} , b_{III}).

Распределение УЭС, полученное в результате выполнения инверсии с применением пространственного фильтра (см. рис. 6, a_{III} , b_{III}), становится более устойчивым и стремится к log-нормальному распределению. В первом случае решение обратной задачи менее устойчиво.

При этом в первом случае в результате решения обратной задачи получены невязки ниже, чем во втором. Это объясняется тем, что не всегда невязка является показателем качества решения обратной задачи и в некоторых случаях чрезмерный подбор кривых ЗСБ приводит к учету случайных полевых погрешностей кривых, не несущих в себе информации.

Проведение интерпретации с применением разработанной методики совместной инверсии соседних зондирований позволяет по-

лучить уверенный результат, который в дальнейшем может использоваться для составления прогнозных карт.

Заключение

По итогам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

– результаты проведенных исследований позволили оценить латеральные пространственные параметры нестационарного электромагнитного поля и понять отличия результатов одномерной инверсии данных ЗСБ относительно истинных параметров целевого горизонта;

– в результате моделирования получена формула пространственной невязки, которая описывается экспоненциальной функцией и применяется при инверсии высокоплотных электромагнитных зондирований для регуляризации обратной задачи при инверсии кривых ЗСБ;

– применение подхода, основанного на методике пространственного накопления в процессе инверсии, позволяет повысить надежность решения обратной задачи ЗСБ за счет устойчивости ее решения.

Список источников

1. Козлов Е. А. Модели среды в разведочной сейсмологии: монография. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2006. 479 с.
2. Ваньян Л. Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109 с.
3. McNeill J. D. Application of transient electromagnetic techniques: technical note TN7. Missasagua: Geonics Limited, 1980. 17 p.
4. Жданов М. С. Геофизическая электромагнитная теория и методы: монография. М.: Научный мир, 2012. 680 с.
5. Светов Б. С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра, 1973. 254 с.
6. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990. 230 с.
7. Oldenburg D. W., Li Y., Aki K., Richards P. G., Alumbaugh D., Newman G. [et al.]. Inversion for applied geophysics: a tutorial // Near-surface geophysics / ed. D. K. Butler. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2005. P. 89–150.
8. Тригубович Г. М., Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г. 3D-электроразведка становлением поля: монография. Новосибирск: Наука, 2009. 217 с.
9. Панкратов В. М., Турицын К. С. Геоэлектрические модели горизонтально-слоистого разреза Непского свода // Обеспечение научно-технического прогресса при геофизических исследованиях в Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск – Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1987. С. 131–135.
10. Поспеев А. В., Буддо И. В., Агафонов Ю. А., Шарлов М. В., Компаниец С. В., Токарева О. В. [и др.]. Современная практическая электроразведка: монография. Новосибирск: Гео, 2018. 231 с.
11. Семинский И. К., Поспеев А. В., Гусейнов Р. Г. Оптимизация метода ЗСБ средствами математического моделирования: монография. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. 129 с.
12. Auken E., Christiansen A. V. Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data // Geophysics. 2004. Vol. 69. Iss. 3. P. 752–761. <https://doi.org/10.1190/1.1759461>.
13. Santos F. A. M. 1-D laterally constrained inversion of EM34 profiling data // Journal of Applied Geophysics. 2004. Vol. 56. Iss. 2. P. 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.04.005>.
14. Wisén R., Auken E., Dahlin T. Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes // Near



Surface Geophysics. 2005. Vol. 3. Iss. 2. P. 71–79. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005002>.

15. Конторович А. Э., Мельников Н. В., Старосельцев В. С. Нефтегазоносные провинции и области Сибирской платформы // Геология и нефтегазоносность Сибирской платформы: сб. статей. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1975. С. 4–21.

16. Табаровский Л. А., Эпов М. И., Антонов Е. Ю. Электромагнитное поле в средах со слабонегоризонтальными границами. Новосибирск: Изд-во ИГГ СО АН СССР, 1988. 20 с.

17. Шарлов М. В., Агафонов Ю. А., Стефаненко С. М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. № 1. С. 20–24.

18. Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г., Тригубович Г. М. Компьютерное моделирование геоэлектромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Физика Земли 2011. № 2. С. 3–14.

19. Емельянов В. С., Суров Л. В., Шарлов М. В., Агафонов Ю. А. Современное программное средство 1D инверсии и моделирования данных ЗСБ Model4 // Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых: XIII Междунар. науч.-практ. семинар. СПб., 2016. С. 115–118.

20. Агафонов Ю. А., Поспеев А. В., Суров Л. В. Система интерпретации данных и основные направления применения нестационарных электромагнитных исследований на юге Сибирской платформы // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 1. С. 33–36.

References

1. Kozlov E. A. *Models of environment in exploratory seismology*. Tver: Izd-vo GERS; 2006. 479 p. (In Russ.).

2. Van'yan L. L. *Fundamentals of electromagnetic sounding*. Moscow: Nedra; 1965. 109 p. (In Russ.).

3. McNeill J. D. *Application of transient electromagnetic techniques: technical note TN7*. Missasagua: Geonics Limited; 1980. 17 p.

4. Zhdanov M. S. *Geophysical electromagnetic theory and methods*. Moscow: Nauchnyi mir; 2012. 680 p. (In Russ.).

5. Svetov B. S. *Theory, methods and interpretation of low-frequency inductive electrical exploration materials*. Moscow: Nedra, 1973; 254 p. (In Russ.).

6. Tikhonov A. N., Goncharskii A. V., Stepanov V. V., Yagola A. G. *Numerical methods for solving ill-defined problems*. Moscow: Nauka; 1990. 230 p. (In Russ.).

7. Oldenburg D. W., Li Y., Aki K., Richards P. G., Alumbaugh D., Newman G., et al. Inversion for applied geophysics: a tutorial. In: Butler D. K. (ed.). *Near-surface geophysics*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists; 2005, p. 89–150.

8. Trigubovich G. M., Persova M. G., Soloveichik Yu. G. *3D TEM sounding*. Novosibirsk: Nauka; 2009. 217 p. (In Russ.).

9. Pankratov V. M., Turitsyn K. S. Geoelectrical models of the Nepa arch horizontally layered section. In: *Obespechenie nauchno-tekhnicheskogo progressa pri geofizicheskikh issledovaniyakh v Vostochnoi Sibiri = Providing scientific and technological progress in geophysical research in Eastern Siberia*. Irkutsk – Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials; 1987, p. 131–135. (In Russ.).

10. Pospeev A. V., Buddo I. V., Agafonov Yu. A., Sharlov M. V., Kompaniets S. V., Tokareva O. V., et al. *Modern practical electrical exploration*. Novosibirsk: Geo; 2018. 231 p. (In Russ.).

11. Seminskiy I. K., Pospeev A. V., Guseinov R. G. *Optimization of TEM sounding by mathematical modeling*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2019. 129 p. (In Russ.).

12. Auken E., Christiansen A. V. Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data. *Geophysics*.

2004;69(3):752-761. <https://doi.org/10.1190/1.1759461>.

13. Santos F. A. M. 1-D laterally constrained inversion of EM34 profiling data. *Journal of Applied Geophysics*. 2004;56(2):123-134. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.04.005>.

14. Wisén R., Auken E., Dahlin T. Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes. *Near Surface Geophysics*. 2005;3(2):71-79. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005002>.

15. Kontorovich A. E., Mel'nikov N. V., Starosel'tsev V. S. Oil and gas provinces and areas of the Siberian platform. In: *Geologiya i neftegazonosnost' Sibirskoi platformy = Geology and oil and gas potential of the Siberian platform*. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials; 1975, p. 4–21. (In Russ.).

16. Tabarovskiy L. A., Epov M. I., Antonov E. Yu. *Electromagnetic field in media with slightly non-horizontal boundaries*. Novosibirsk: Institute of Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1988. 20 p. (In Russ.).

17. Sharlov M. V., Agafonov Yu. A., Stefanenko S. M. SGS-TEM and FastSnap modern telemetric electrical exploration stations. Efficiency and application experience. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*. 2010;1:20-24. (In Russ.).

18. Persova M. G., Soloveichik Y. G., Trigubovich G. M. Computer modeling of geoelectromagnetic fields in three-dimensional media by the finite element method. *Fizika Zemli*. 2011;2:3-14. (In Russ.).

19. Emelianov V. S., Surov L. V., Sharlov M. V., Agafonov Yu. A. Model 4 as a modern software tool for TEM data 1D inversion and modeling. In: *Primenenie sovremennykh elektrorazvedochnykh tekhnologii pri poiskakh mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh: XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. seminar = Application of modern electrical exploration technologies in the search for mineral deposits: 13th International scientific and practical seminar*. Saint Petersburg; 2016, p. 115–118. (In Russ.).

20. Agafonov Yu. A., Pospeev A. V., Surov L. V. Data



interpretation system and main application directions researched in the South of the Siberian platform. *Pribory
of non-stationary electromagnetic sounding-based i sistemy razvedochnoi geofiziki*. 2006;1:33-36. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Мурзина Екатерина Викторовна,
инженер Лаборатории нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
ведущий геофизик,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,
mkv@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-1125-8838>.

Ekaterina V. Murzina,
Engineer of Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
Leading Geophysicist,
LLC SIGMA-GEO,
Irkutsk, Russia,
mkv@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-1125-8838>.



Поспеев Александр Валентинович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
avp@crust.irk.ru.

Alexandr V. Pospeev,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Leading Researcher,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
avp@crust.irk.ru.



Семинский Игорь Константинович,
кандидат геолого-минералогических наук,
начальник Центра комплексного мониторинга опасных геологических процессов,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
ведущий специалист по технологиям электроразведки,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,
iks@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-7530-0716>.

Igor K. Seminskiy,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Centre for Geological Hazard Integrated Monitoring,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
Leading Specialist in Electrical Exploration Technologies,
LLC SIGMA-GEO,
Irkutsk, Russia,
iks@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-7530-0716>.

**Буддо Игорь Владимирович,**

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий Лабораторией комплексной геофизики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
главный геофизик,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,
biv@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>.

Igor V. Buddo,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Integrated Geophysics Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Chief Geophysicist,
LLC SIGMA-GEO,
Irkutsk, Russia,
biv@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>.

**Немцева Дарья Борисовна,**

аспирант,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
геофизик,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,
ndb@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0585-0349>.

Daria B. Nemtseva,

Postgraduate,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
Geophysicist,
LLC SIGMA-GEO,
Irkutsk, Russia,
ndb@sigma-geo.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0585-0349>.

**Емельянов Вячеслав Сергеевич,**

ведущий специалист по разработке программного обеспечения,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,
evs@sigma-geo.ru.

Vyacheslav S. Emelianov,

Leading Software Development Specialist,
LLC SIGMA-GEO,
Irkutsk, Russia,
evs@sigma-geo.ru.



Агафонов Юрий Александрович,
директор,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,
agafonov@sigma-geo.ru.
Yuri A. Agafonov
Director,
LLC SIGMA-GEO,
Irkutsk, Russia,
agafonov@sigma-geo.ru.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 03.03.2022; одобрена после рецензирования 06.04.2022; принята к публикации 11.05.2022.

The article was submitted 03.03.2022; approved after reviewing 06.04.2022; accepted for publication 11.05.2022.