



ЗНАЧЕНИЕ ПОВОРОТА И НОРМАЛИЗАЦИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПЕРЕД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ

Н.М. ШАГАРОВА^{1,2,*}, В.А. КУЛИКОВ^{1,2}, Е.Д. АЛЕКСАНОВА²

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

1, тер. Ленинские Горы, г. Москва 119991, Россия

² ООО «Северо-Запад»

9, 1-й Дорожный проезд, г. Москва 117545, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) является важным методом геофизики, используемым для изучения распределения удельного электрического сопротивления (УЭС). Метод МТЗ широко применяется при решении прикладных задач, в том числе при поисках рудных залежей. Однако интерпретация МТ-данных осложняется искажениями, вызванными неоднородностью среды, рельефом и другими факторами. Для повышения достоверности интерпретации применяются процедуры поворота и нормализации (коррекции статического смещения) данных.

Цель. Исследовать влияние процедур поворота и нормализации магнитотеллурических данных на точность определения параметров целевых объектов, таких как рудные залежи, при количественной интерпретации с использованием 2D-инверсии.

Материалы и методы. Исследование выполнено на основе синтетических данных, рассчитанных для 3D-моделей с различными азимутами простирания проводящих тел и наличием приповерхностных неоднородностей. Использовались программы ModEM для расчета прямой 3D-задачи и ZondMT2D для двумерной инверсии. В программе Inversio проводились процедуры поворота данных, нормализации на разных частотах (10, 100, 1000 Гц) и корректировки дистанций (сноса на интерпретационные профили).

Результаты. Установлено, что низкочастотная нормализация (10 Гц) обеспечивает наиболее точное соответствие исходной модели, в то время как высокочастотная нормализация приводит к появлению ложных аномалий (артефактов). Процедура поворота данных улучшает локализацию целевых объектов, а применение корректировки дистанций устраняет артефакты. Наилучшие результаты достигаются при последовательном выполнении сначала поворота, а потом нормализации.

Заключение. Процедуры поворота и нормализации данных МТЗ существенно повышают достоверность интерпретации, то есть точность определения параметров целевых объектов (положение границ и значения УЭС) и степень проявленности артефактов. Рекомендуется использовать низкочастотную нормализацию и корректировку дистанций для повышения достоверности. Разработанный алгоритм может быть применен при поиске рудных месторождений и других геофизических исследованиях.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, поворот данных, нормализация, инверсия, геоэлектрическая модель, рудные месторождения

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Шагарова Н.М., Куликов В.А., Алексанова Е.Д. Значение поворота и нормализации магнитотеллурических данных перед количественной интерпретацией. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2025;67(4):74—86. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-4-74-86> EDN: [QVWKIG](https://www.edn.ru/)

Статья поступила в редакцию 16.07.2025

Принята к публикации 10.10.2025

Опубликована 22.12.2025

* Автор, ответственный за переписку

INCREASING THE DEVELOPMENT EFFICIENCY OF GAS CONDENSATE FIELDS BY OPTIMIZING WELL ARRANGEMENT PATTERNS AND GAS PRODUCTION ELEMENTS

NATALIA M. SHAGAROVA^{1,2,*}, VIKTOR A. KULIKOV^{1,2}, ELENA D. ALEKSANOVA²

¹ Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

² Nord-West Ltd
9, 1st Dorozhny proezd, Moscow 117545, Russia

ABSTRACT

Background. Effective planning of gas and gas-condensate fields requires an integrated approach, which could ensure maximal economic effects while observing the conditions for the rational use of hydrocarbon reserves of the field. This includes not only effective technological solutions for field development, such as the number of wells and development systems, but also the optimal design of the entire infrastructure.

Aim. To develop a methodology for optimizing the placement of production wells, well pads, and booster compressor stations (BCS) taking into account technological, economic, and geographical constraints.

Materials and methods. The proposed approach is based on mathematical modeling, including an analysis of the density of reserves in the reservoir for the most competent placement of design wells, accounting for the costs of infrastructure construction and minimizing the costs of gas transportation. Additionally, landscape constraints affecting the placement of infrastructure facilities are considered.

Results. The developed approach allows the amount of hydrocarbon reserves involved in development to be maximized and the capital costs for infrastructure construction and operating costs to be minimized, which constitutes the key task of gas field planning.

Conclusion. The developed methodology and its software implementation can be used in the design of new gas condensate fields, as well as for optimizing the development schemes of existing facilities.

Keywords: gas field optimization, integrated modeling, collection and transportation network, cost minimization, gas field, well number optimization, well placement optimization, cluster placement optimization

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: the study had no sponsorship

For citation: Shagarova N.M., Kulikov V.A., Aleksanova E.D. Increasing the development efficiency of gas condensate fields by optimizing well arrangement patterns and gas production elements. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2025;67(4):74—86. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-4-74-86> EDN: QVWKIG

Manuscript received 16 July 2025

Accepted 10 October 2025

Published 22 December 2025

* Corresponding author

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) является одним из ключевых методов геоэлектрики, позволяющим исследовать распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) в земной коре и верхней мантии. Этот метод основан на измерении вариаций естественного электромагнитного (ЭМ) поля Земли. В последние годы МТ-методы стали широко применяться в рудной геофизике при поисках полезных ископаемых.

Интерпретация МТ-данных осложняется наличием искажений, связанных с неоднородностью приповерхностной части разреза, влиянием рельефа, анизотропией среды и другими факторами. Также нередко трехмерные геоэлектрические структуры интерпретируются в рамках двумерных моделей. При игнорировании этих факторов в процессе анализа и инверсии кривых МТЗ существует высокий риск получения некорректных геоэлектрических моделей и основанных на них ошибочных выводах о геологическом строении участка.

Искажения кривых МТЗ имеют два основных механизма: гальванический и индукционный. Гальванические искажения возникают вследствие появления избыточных зарядов на участках с различной электропроводностью, а индукционные искажения связаны с действием избыточных токов [1]. Гальванический эффект также известен в МТЗ как S-эффект, поскольку его влияние на кривые МТЗ на больших периодах зондирования зависит от неоднородности суммарной продольной проводимости разреза [2].

Характер проявления эффектов различен. При гальванических искажениях кривая кажущегося сопротивления смещается относительно нормальной кривой по оси сопротивлений без изменения формы, а фазовые кривые совпадают, поэтому искажения такого типа часто называют статическим смещением. Индукционный эффект характеризуется более сложным характером искажений, часто приводящим к появлению ложных перегибов и экстремумов на кривых кажущегося сопротивления, что создает эффект несуществующих проводящих или высокоомных слоев [2].

Наиболее распространенными являются именно гальванические искажения, вызванные локальными приповерхностными неоднородностями. Из-за малого размера этих неоднородностей они не могут быть включены в интерпретационную модель. Существует несколько методов коррекции гальванических искажений кривых МТЗ, которые часто называются процедурой «нормализации» МТ-данных, и последующей интерпретации данных с применением одномерной инверсии

[3]. Среди них: пространственная фильтрация, использование тензора искажений, моделирование, использование при инверсии только ТЕ-моды электромагнитного поля и др. Также для нормализации амплитудных кривых МТЗ используется метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), который обладает большей устойчивостью к гальваническим искажениям и позволяет учитывать неоднородность верхней части разреза для оценки параметров глубинных структур.

Наиболее распространенной процедурой нормализации является «статистическая нормализация», которая заключается в пространственной фильтрации значений модуля импеданса на определенной частоте («частоте нормализации») для вычисления поправочных коэффициентов для смещения амплитудных кривых. Такой способ нормализации наиболее эффективен при частом шаге наблюдений (много меньше, чем «целевые» объекты поиска) [3]. Частота нормализации и радиус сглаживания подбираются опытным путем исходя из степени проявленности неоднородностей, размера целевых объектов, шага между точками наблюдений.

Ошибки в результатах интерпретации МТ-данных могут возникнуть также в случае, когда 2D-инверсия проводится для трехмерных объектов или линии наблюдений расположены не вкрест к изучаемым квазидвумерным объектам.

В случаях когда геоэлектрическая модель близка к двумерной, для успешного применения 2D-инверсии необходимо выполнение двух условий: профили наблюдений должны располагаться вкрест структур; измерительная установка должна быть ориентирована вдоль и вкрест структур. Однако информация об азимуте простирания поисковых объектов не всегда имеется в наличии, и при проведении полевых работ направление профилей наблюдения может быть задано под любым углом. Это же касается и выбора ориентации измерительной установки (измерительных линий и датчиков магнитного поля).

Качественный анализ данных в большинстве случаев позволяет определить главные направления поляризации теллурического поля. Эту оценку можно сделать на основе анализа полярных диаграмм тензора импеданса, по поведению векторов Визе, по аномалиям компонент горизонтального магнитного тензора или на основе эллипсов фазового тензора. Учитывая эту информацию, можно выполнить процедуру поворота к азимуту выявленных направлений теллурических токов либо на уровне компонент электромагнитного поля, либо на уровне компонент тензора импеданса.

Представленная работа призвана продемонстрировать влияние процедур поворота и статистической нормализации магнитотеллурических данных на точность определения параметров целевых объектов поиска.

Модельный ряд

Решение поставленной задачи выполнялось на основе интерпретации синтетических данных, полученных по результатам расчета прямой 3D-задачи.

Вмещающий разрез для всего модельного ряда представлен высокоомной изотропной средой с $УЭС = 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. В основании модели располагаются проводящие породы: с глубины 2 км — $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, с глубины 30 км — $20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

В верхней, высокоомной части разреза располагается вытянутое проводящее тело ($УЭС = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), имитирующее рудную залежь и являющееся целевым объектом. Ширина и мощность проводника для всех моделей одинаковы: 300 и 200 метров соответственно. Азимут простирания проводника изменялся от 0° до 80° , притом

что азимут профилей наблюдения для всех моделей составлял 90° (восток — запад). Таким образом, были сформированы четыре базовые модели, различающиеся по величине угла между направлением простирания проводника и профилями наблюдений: 90° , 60° , 30° и 10° (рис. 1).

Базовые модели, представленные на рисунке 1, усложнялись добавлением в приповерхностной части геоэлектрических неоднородностей (рис. 2). Все неоднородности можно разделить на две группы: крупные неоднородности, имитирующие нецелевые геологические объекты, часто встречающиеся на поисковых площадях, и локальные неоднородности произвольной формы и $УЭС$, имеющие размеры не более десятков метров. К первой группе относятся такие объекты, как: коры выветривания, карстовые воронки, интрузивные тела, талики (в случае мерзлых пород), тектонические нарушения, рыхлые четвертичные отложения различной мощности и пр.

В итоге для каждой из четырех базовых моделей рассчитывались четыре варианта, включающих разное количество приповерхностных

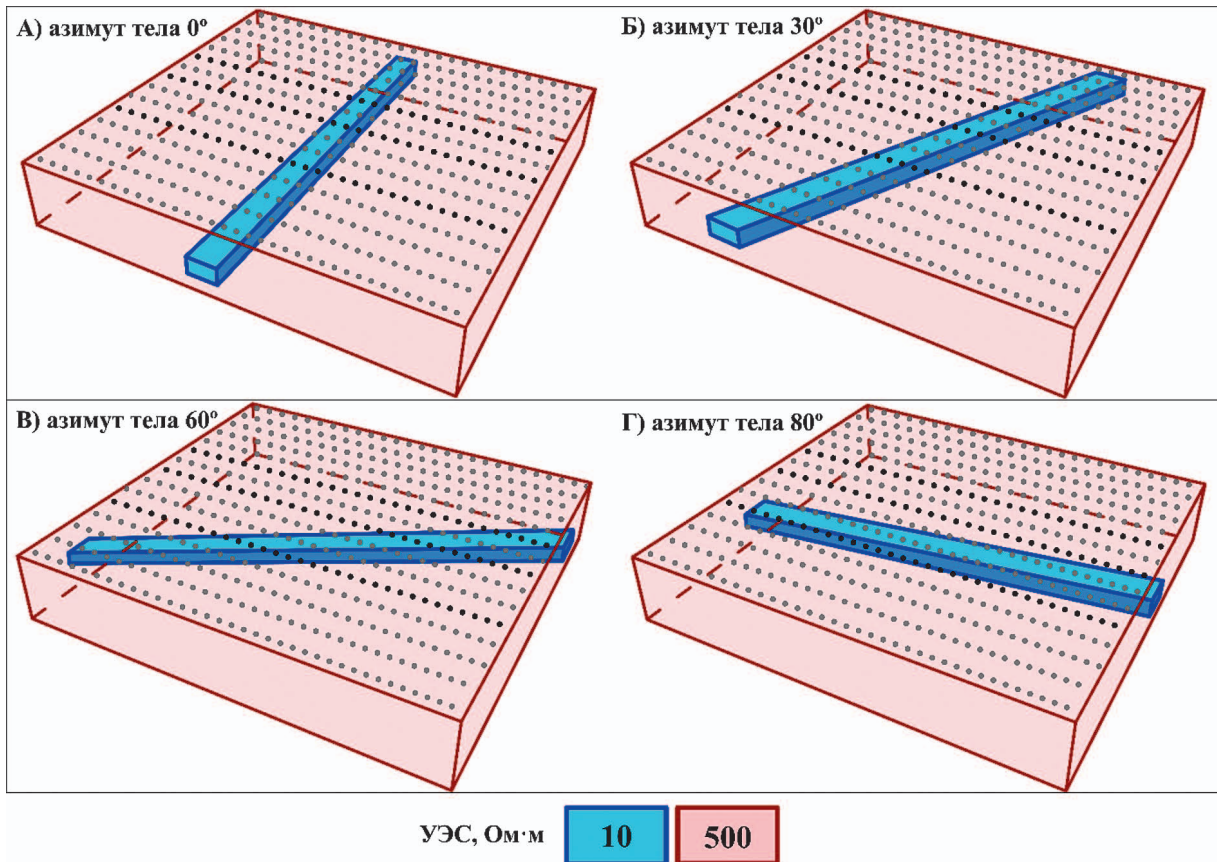


Рис. 1. Базовые модели, отличающиеся азимутом простирания проводника

Fig. 1. Basic models with different directions of the conductor

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ / GEOPHYSICAL METHODS OF PROSPECTING AND EXPLORATION

неоднородностей, а общее число моделей составило 16.

Расчет прямой 3D-задачи выполнялся с помощью программы ModEM [4]. Горизонтальный размер области моделирования: 4×4 км. Горизонтальный размер ячейки: 50×50 м в области моделирования и увеличивался в геометрической прогрессии за края области моделирования.

Вертикальная сетка: мощность первой ячейки 5 м; до глубины 100 м мощности ячеек увеличивались с шагом 5 м; далее до глубины 1 км величина ячеек составляла 50 м (рис. 3). От глубины 1 км вертикальный размер ячеек увеличивался в геометрической прогрессии с коэффициентом 1,5. Максимальная глубина модели составила 233 км. По результатам расчета прямой 3D-задачи были

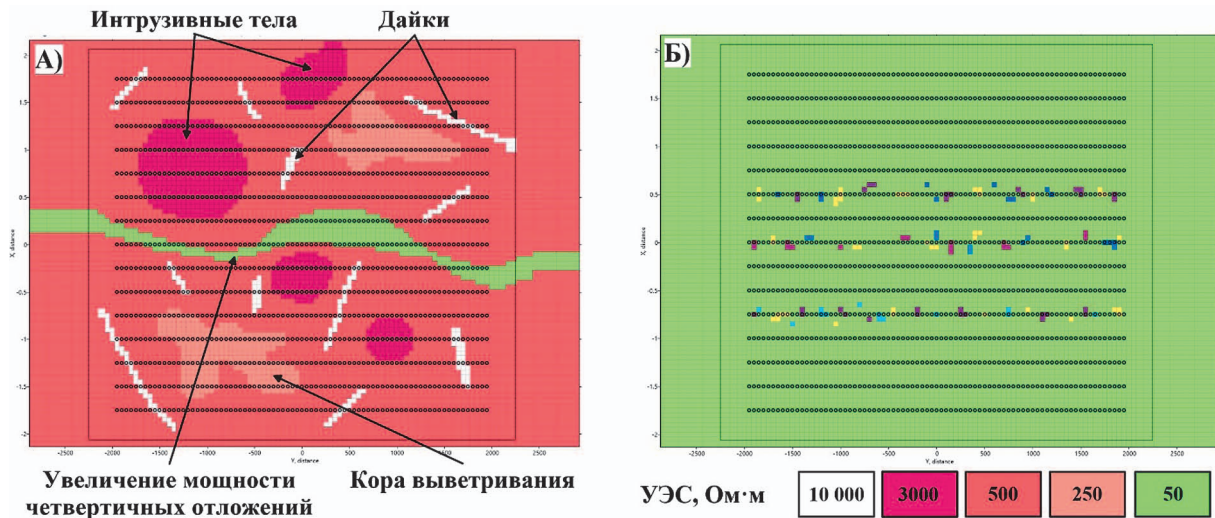


Рис. 2. Приповерхностные неоднородности (А — крупные, Б — локальные)
Fig. 2. Near-surface inhomogeneities (A — large-scale, B — local)

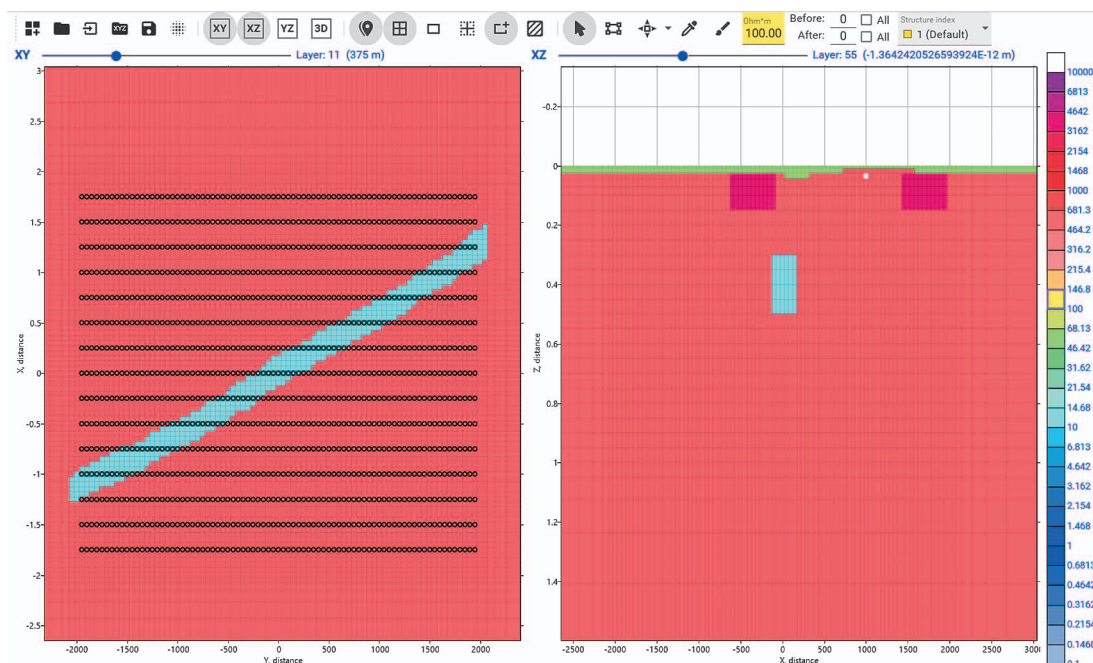


Рис. 3. Фрагмент рабочего окна программы «Inversio», в которой создавались 3D-модели УЭС для расчета прямой задачи
Fig. 3. Fragment of the working window of the «Inversio» software, where 3D models of resistivity were created to calculate a forward problem

получены магнитотеллурические параметры в виде компонент тензора импеданса и магнитовариационные параметры в виде компонент матрицы Визе. Значения рассчитывались на частотах от 1 до 10 кГц (5 точек на декаду).

Подготовка данных к двумерной инверсии

Перед проведением двумерной инверсии выполнялся качественный анализ МТ/МВ-данных в современном программном комплексе «Inversio», разработанном в компании ООО «Северо-Запад».

В программе «Inversio» реализованы все распространенные алгоритмы анализа МТ/МВ-данных, описанные в последних трудах М.Н. Бердичевского и В.И. Дмитриева [2]. Основной акцент делался на анализ карт и псевдоразрезов кажущегося сопротивления, фазы импеданса, типперов и фазового тензора для определения параметров нормализации и угла поворота МТ-данных (рис. 4).

Для каждой из 16 рассчитанных 3D-моделей выполнялась 2D-инверсия по отдельным профилям. Перед инверсией использовались 11 разных сценариев нормализации и поворота синтетических данных:

- 1) без поворота и нормализации;
- 2) без поворота. Нормализация на частоте 1000 Гц;
- 3) без поворота. Нормализация на частоте 100 Гц;
- 4) без поворота. Нормализация на частоте 10 Гц;

5) поворот данных на 30°/60°/80°. Без нормализации;

6) первый этап — нормализация на частоте 1000 Гц, второй этап — поворот данных на 30°/60°/80°;

7) первый этап — нормализация на частоте 100 Гц, второй этап — поворот данных на 30°/60°/80°;

8) первый этап — нормализация на частоте 10 Гц, второй этап — поворот данных на 30°/60°/80°;

9) первый этап — поворот данных на 30°/60°/80°, второй этап — нормализация на частоте 1000 Гц;

10) первый этап — поворот данных на 30°/60°/80°, второй этап — нормализация на частоте 100 Гц;

11) первый этап — поворот данных на 30°/60°/80°, второй этап — нормализация на частоте 10 Гц.

Инверсия проводилась в двух вариантах: бимодальная (по ТМ- и ТЕ-модам) и бимодальная с участием компонент матрицы Визе (типперов).

Для моделей, где тело располагалось под углом к профилям наблюдений, для более корректной работы алгоритмов инверсии производилась процедура «коррекции дистанций». Для этого строился «виртуальный» интерпретационный профиль так, чтобы он проходил вкrest тела и точки измерения сносились на него (рис. 5).

Двумерная инверсия проводилась в программе ZondMT2D (А.Е. Каминский) [5]. Для объективности

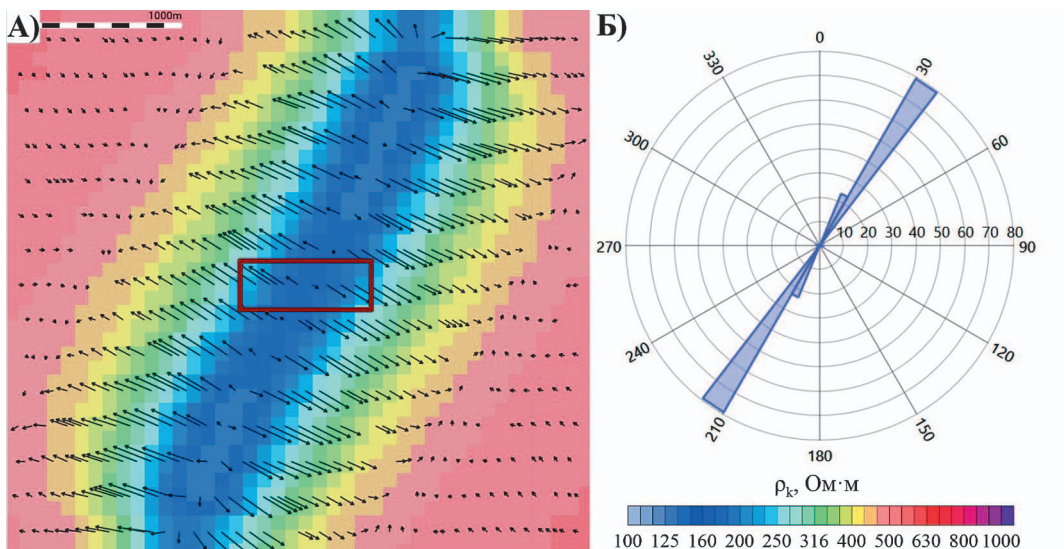


Рис. 4. Карта кажущегося сопротивления и типперы на частоте 50 Гц (А) и диаграмма розы ветров направлений большой оси эллипсов фазового тензора для выделенной области (коричневый контур) для частот 100—1000 Гц (Б)

Fig. 4. The map of the apparent resistivity and tippers for the frequency 50 Hz (A) and the rose chart of the directions of the phase tensor ellipsis major axis for the selected area (brown rectangular) for the frequency range 100—1000 Hz (B)

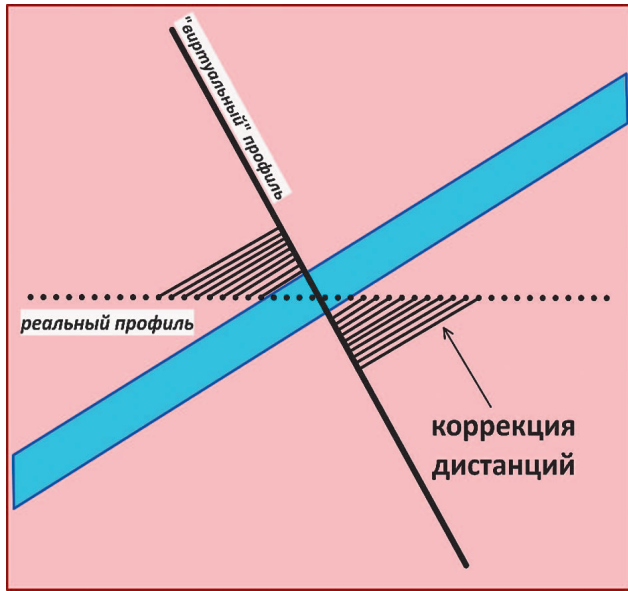


Рис. 5. Схема процедуры «коррекции дистанций»
Fig. 5. The scheme of the “distances correction” procedure

итогового результата во всех случаях были использованы одинаковые параметры инверсии: горизонтальная и вертикальная сетка моделирования, количество итераций, стартовое сопротивление модели, радиус сглаживания, набор инвертируемых компонент и их веса.

Параметры, с которыми проводилась двумерная инверсия:

- стартовая модель: однородное изотропное полупространство с УЭС 200 Ом·м;
- вертикальная сетка: размер первой ячейки — 10 м, количество слоев — 50, геометрический коэффициент увеличения мощности каждого

следующего слоя — 1,05, максимальная глубина модели 2 000 м;

- размер ячейки по горизонтальной оси — 25 м;
- тип инверсии — smoothness constrained;
- количество итераций инверсии — 3;
- радиус сглаживания — 1.

Ниже приводится поэтапное сравнение влияния процедур поворота и нормализации МТ-данных на результаты двумерной инверсии. Так как приповерхностные неоднородности распределены по модели неравномерно и на разных профилях оказывают разное искажающее действие, то и демонстрация тех или иных процедур, предшествующих инверсии, показана на разных профилях: № 6, 8, 11 (рис. 6А).

Влияние частоты нормализации

На первом этапе было изучено влияние выбора частоты нормализации на результаты инверсии (рис. 7). Для демонстрации ниже рассмотрены результаты для базовой Модели А, в которой профили наблюдений расположены ортогонально к простиранию проводника (рис. 1А). Статистическая нормализация выполнялась с радиусом 200 метров на частотах 1000, 100 и 10 Гц.

По визуальной оценке очевидно, что результат инверсии после низкочастотной нормализации (частота 10 Гц) наиболее близок к исходной модели, а при интерпретации данных, нормализованных на высоких частотах, возникают ложные объекты, появление которых мы связываем с остаточным влиянием приповерхностных неоднородностей.

Влияние поворота данных

Следующие процедуры рассматривались для Модели В, для которой азимут простирания

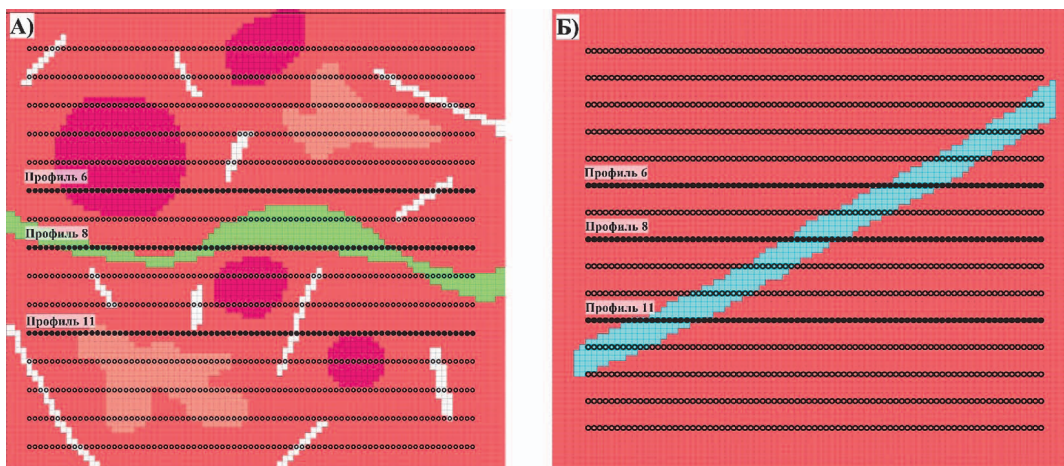


Рис. 6. Профили наблюдений, выбранные для демонстрации результатов
Fig. 6. Observation lines selected to demonstrate the results

Значение поворота и нормализации магнитотеллурических данных перед количественной интерпретацией

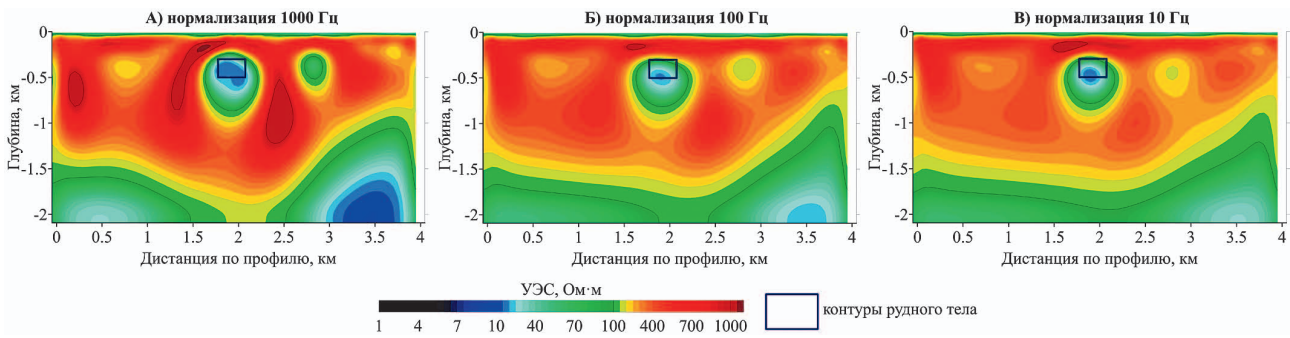


Рис. 7. Влияние выбора частоты нормализации данных на результаты инверсии (Профиль 8)
 Fig. 7. The effect of frequency selection for data normalization procedure on inversion results (Line 8)

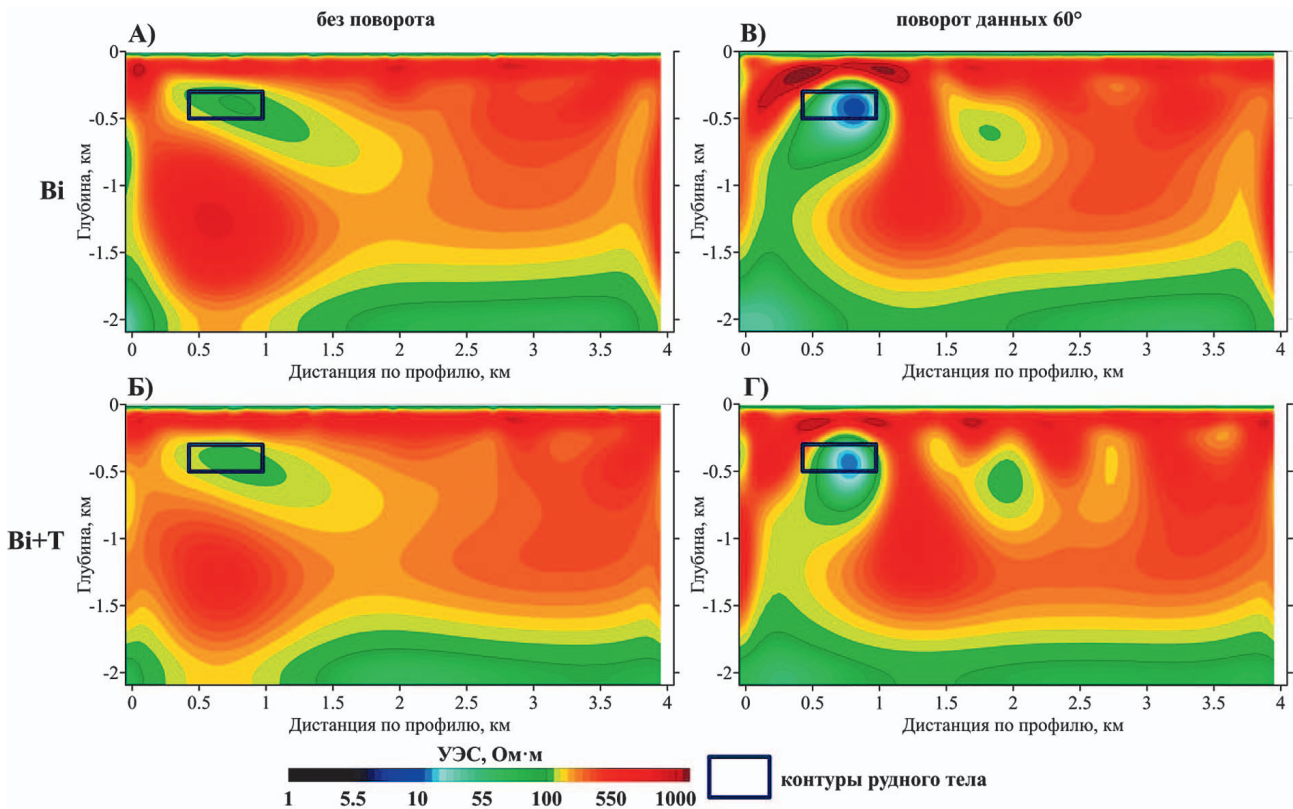


Рис. 8. Влияние поворота данных на результаты инверсии (Профиль 11)
 Fig. 8. The effect of data rotation on inversion results (Line 11)

проводника составляет 60° (рис. 1В, 6Б) при наличии всех введенных неоднородностей (рис. 2). Было проведено сравнение результатов инверсии синтетических данных, прошедших и не прошедших процедуру поворота на 60° .

По результатам инверсии данных без поворота (рис. 8А, Б) видно, что целевого объекта восстанавливается, однако его форма, размеры и УЭС не соответствуют исходной модели. При инверсии повернутых данных параметры целевого

проводящего тела восстанавливаются лучше, но в итоговой модели присутствуют некоторые артефакты, которые могут привести к выделению ложных объектов (рис. 8В, Г). В качестве еще одного вывода можно отметить, что привлечение к инверсии магнитовариационных параметров (бимодальная инверсия с подбором типпера) уменьшает эффект «затягивания» проводника на большую глубину (рис. 8Г), но при этом незначительно повышается УЭС целевого объекта.

Влияние процедуры «корректировки дистанций»

На следующем этапе для тех же синтетических данных базовой Модели В (рис. 1В, 6Б), для которых осуществлялась процедура поворота, были проведена корректировка дистанций между точками наблюдений за счет сноса на виртуальный профиль, ориентированный вкрест простирания целевого объекта (рис. 5). По результатам двумерной инверсии можно отметить, что процедура корректировки дистанций позволила практически полностью справиться с артефактами (рис. 9В, Г), которые возникали на предыдущем этапе (рис. 9А, Б). Наиболее близкий к исходной модели результат дает инверсия без привлечения типперов (рис. 9В).

Влияние порядка выполнения поворота и нормализации данных

По полученным результатам можно сделать вывод, что порядок проведения процедур поворота и нормализации не сильно влияет на результат 2D-инверсии. Однако для отдельных вариантов отличия есть, и они складываются в пользу последовательности: 1) поворот, 2) нормализация. В качестве примера на рисунке 10 приведены инверсии,

полученные для базовой Модели В (рис. 1В). Если на первом этапе была проведена нормализация, а затем поворот МТ данных, то на результатах инверсии вместо одного проводника мы видим две проводящие области, центры которых не совпадают с положением целевого объекта в стартовой модели. Если же на первом этапе был выполнен поворот, то по результатам бимодальной инверсии без привлечения МВ параметров выделяется один проводник, совпадающий с реальным положением проводника в исходной модели.

Выводы по результатам моделирования

Подводя итоги моделирования, приведем сопоставление двух результатов инверсии (Модель В): первый вариант инверсии выполнен по исходным данным, полученным в результате расчета прямой 3D-задачи (рис. 11А, Б), а во втором случае синтетические данные подвергались предварительным процедурам: повороту, нормализации, коррекции дистанций (рис. 11В, Г). Наглядно видно, что результаты инверсии МТ-данных после применения предварительных процедур приближаются к исходной модели, контуры целевого проводящего объекта хорошо восстанавливаются. В то же

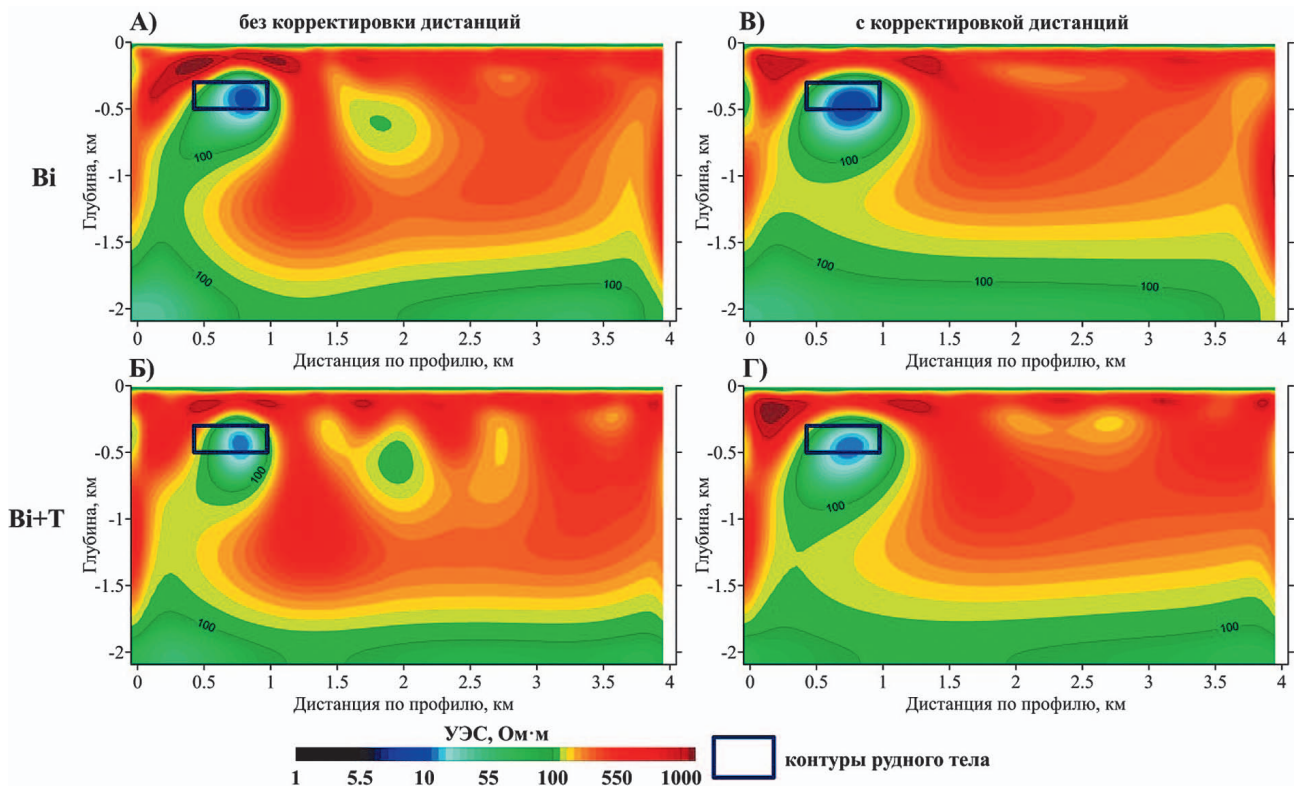


Рис. 9. Влияние процедуры «корректировки дистанций» на результаты инверсии (Профиль 11)
Fig. 9. The effect of the “distances correction” procedure on inversion results (Line 11)

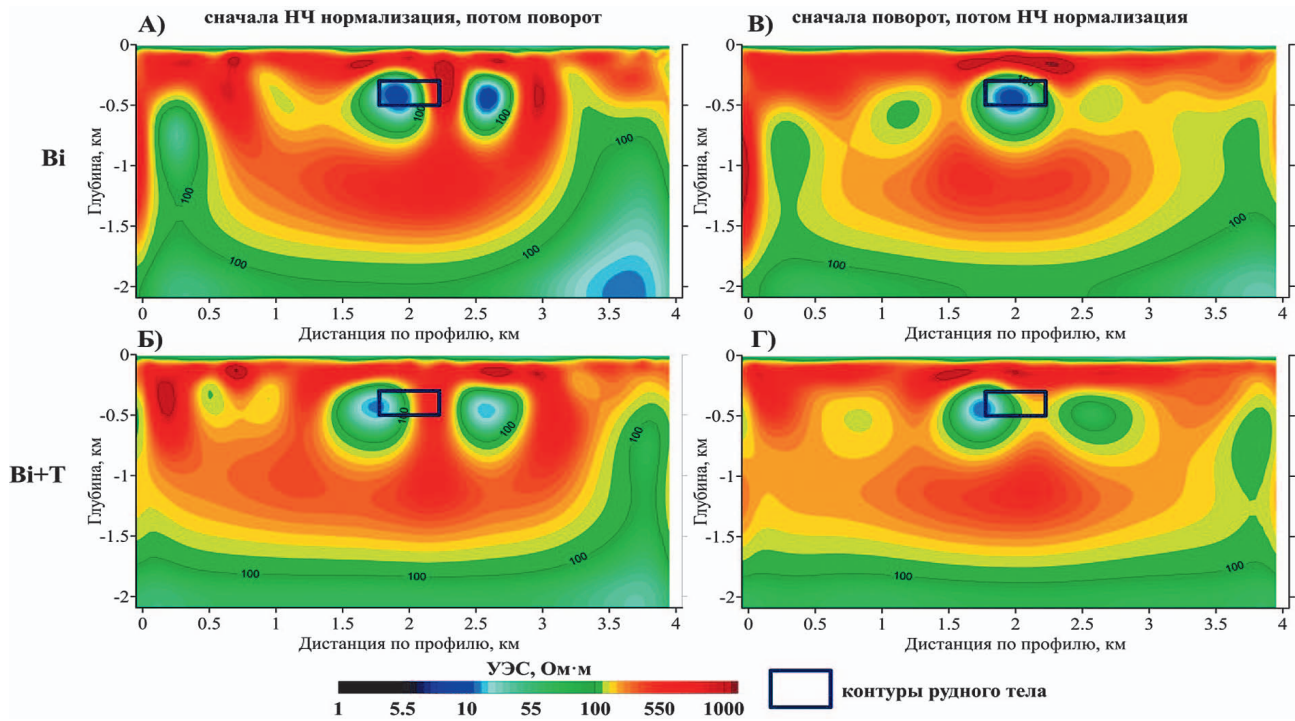


Рис. 10. Влияние порядка проведения процедур поворота и нормализации данных на результаты инверсии (Профиль 8)

Fig. 10. The effect of order of application of data rotation and normalization procedures on inversion results (Line 8)

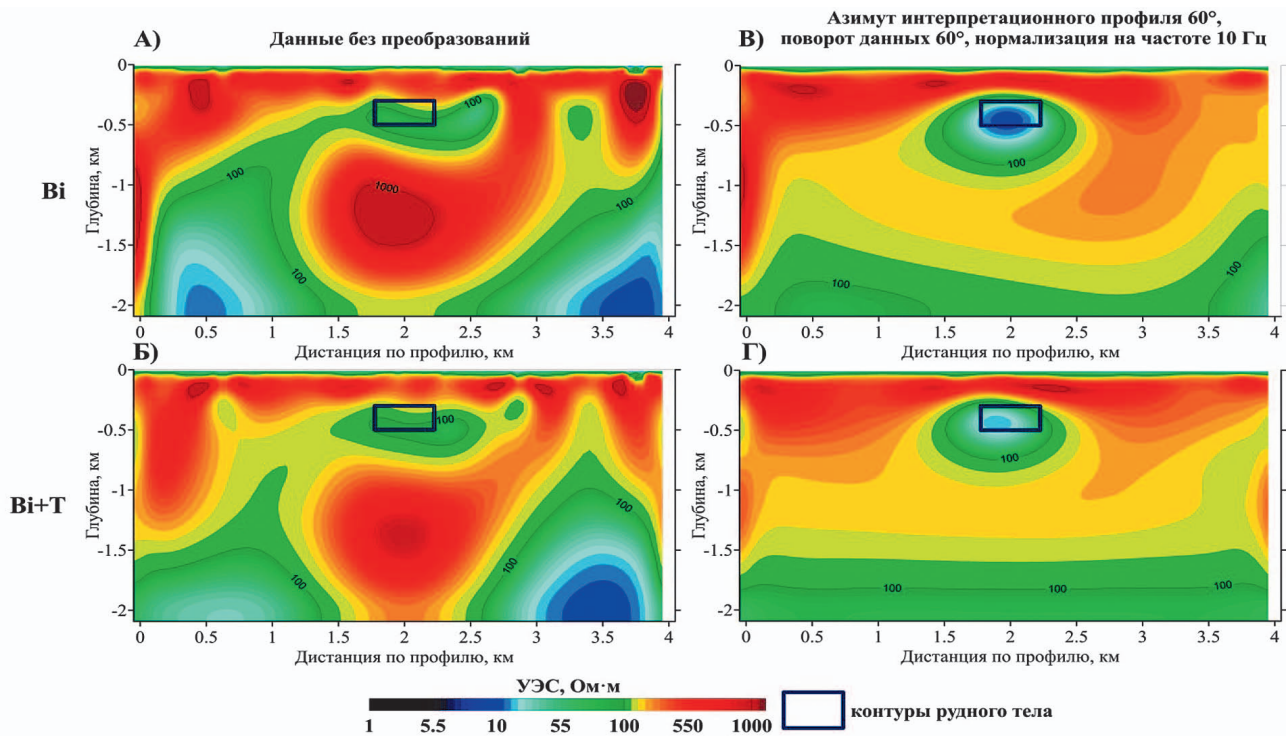


Рис. 11. Сравнение результатов инверсии для данных без преобразований (А, Б) и данных, к которым были применены процедуры корректировки дистанций, поворота и нормализации (В, Г)

Fig. 11. Comparison of inversion results for data without any transformations (right) and for data after application of distances correction, rotation, and normalization procedures (left)

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ / GEOPHYSICAL METHODS OF PROSPECTING AND EXPLORATION

время результаты инверсии МТ-данных без преобразований демонстрируют сильные отклонения от истинной модели.

Применение процедур поворота и нормализации для реальных полевых данных

На флангах крупного рудного месторождения в Красноярском крае были проведены работы методом АМТЗ по сети субширотных профилей. Анализ карты аномального магнитного поля показал, что азимут основных геологических структур на площади работ имеет простирание с СЗ на ЮВ и располагается под углом примерно 45° по отношению к профилям наблюдений.

Перед количественной интерпретацией проводились процедуры поворота данных, нормализации и коррекции дистанций. Априорные геологические данные и результаты бурения для исследуемой площади отсутствуют, поэтому мы можем судить только о влиянии перечисленных процедур на результаты двумерной инверсии (рис. 12).

Для обоих профилей можно отметить, что процедура «корректировки дистанций» меняет кар-

тину распределения УЭС, выделяя в разрезах пологие структуры. Для Профиля № 6 данная процедура убирает «хвост» проводника на западном конце профиля. Применение для данных всех процедур позволяет локализовать проводящий объект как по вертикали, так и по латерали. Для профиля № 7 можно отметить, что процедуры поворота и нормализации особо не меняют структуру модели УЭС, при этом «корректировка дистанций» выделяет контрастный проводящий объект на западном конце профиля, убирая слабоконтрастную аномалию на востоке (рис. 12).

Заключение

В результате проведенного исследования были получены следующие основные выводы. Процедуры поворота и нормализации являются необходимыми элементами подготовки магнитотеллурических данных к количественной интерпретации. Они позволяют существенно повысить достоверность получаемых результатов.

Частота нормализации оказывает значительное влияние на качество инверсии. Низкочастотная

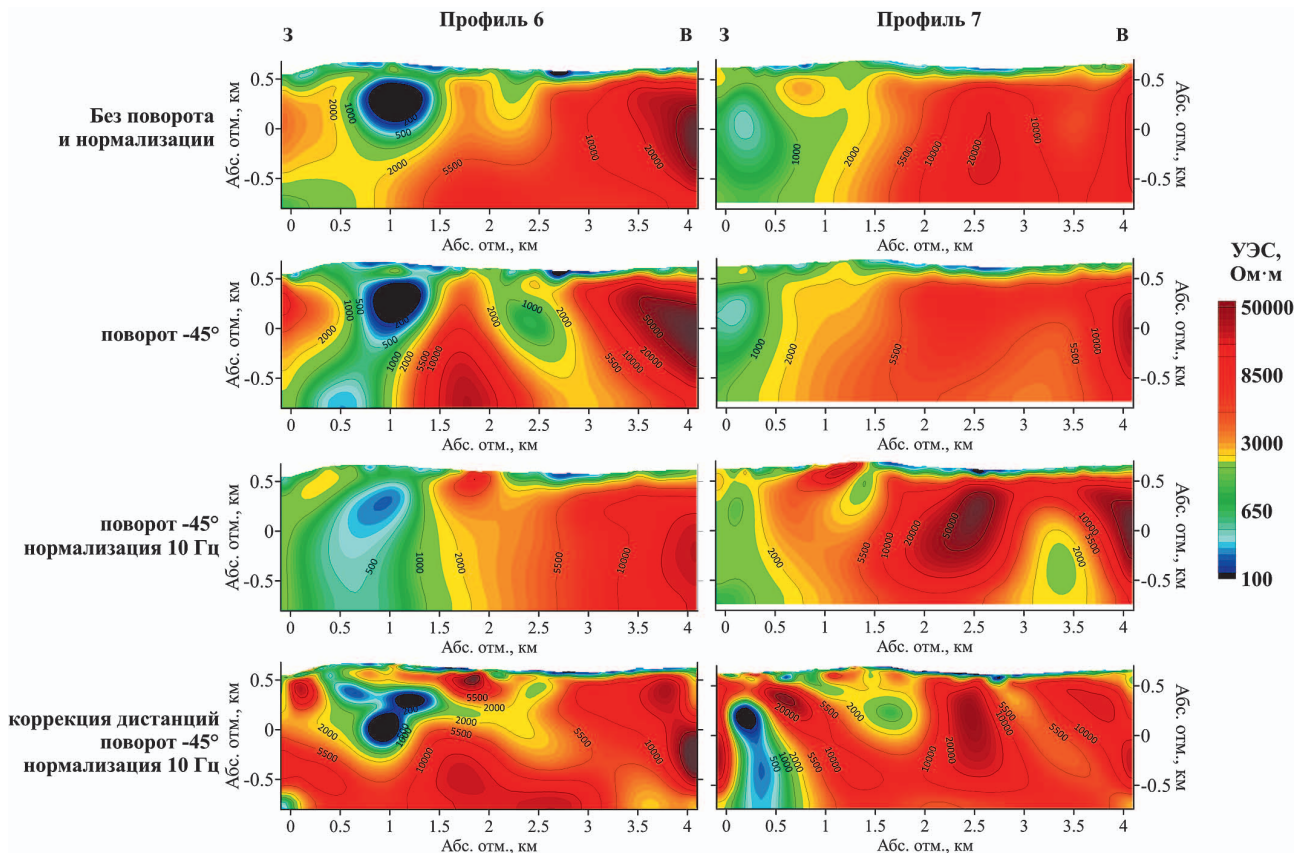


Рис. 12. Применение процедур поворота, нормализации и коррекции дистанций для реальных полевых данных
Fig. 12. Application of rotation, normalization and distances correction procedures for field data

нормализация (10 Гц) дает наиболее близкие к исходной модели результаты, в то время как высокочастотная нормализация приводит к появлению ложных геоэлектрических структур. Процедура поворота данных улучшает локализацию целевого объекта, однако может приводить к появлению дополнительных аномалий. Компенсация этого эффекта достигается при участии типперов в процессе инверсии. Порядок выполнения процедур поворота и нормализации оказывает незначительное влияние на конечный результат, однако предпочтительным является следующий порядок: сначала поворот данных, затем низкочастотная нормализация.

Процедура «корректировки дистанций» является эффективным инструментом для устранения артефактов, возникающих при несовпадении

азимута простирания изучаемого объекта и профилей наблюдений. Применение полного комплекса процедур (поворот, нормализация, корректировка дистанций) позволяет максимально приблизить результаты инверсии к исходной геоэлектрической модели.

Разработанный алгоритм может быть успешно применен при решении различных геофизических задач, в том числе при поисках рудных месторождений.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния различных параметров процедур подготовки МТ-данных на качество инверсии в условиях более сложных геоэлектрических моделей, например при наличии сильных перепадов рельефа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альпин Л.М. Теория поля. М.: Недра, 1966. 384 с.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
3. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Т. I, изд. 2. Под ред. И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. Тверь: Полипресс, 2018. 276 с.
4. Kelbert A., Meqbel N., Egbert G.D., Tandon K. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // Computers & Geosciences. 2014. Vol. 66. P. 40—53.
5. Zond geophysical software: официальный сайт компании. Режим доступа: <http://zond-geo.com> (дата обращения: 13.07.2025).

REFERENCES

1. Alpin L.M. Field Theory. Moscow: Nedra, 1966. 384 p. (In Russ.).
2. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and Methods of Magnetotellurics. Moscow: Nauchny Mir, 2009. 680 p. (In Russ.).
3. Electromagnetic Prospecting: A Guide to Electromagnetic Prospecting Practice for Students of Geophysical Specialties. Vol. I, Ed. 2. Edited by I.N. Modin and A.G. Yakovlev. Tver': Polyppress, 2018. 276 p. (In Russ.).
4. Kelbert A., Meqbel N., Egbert G.D., Tandon K. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // Computers & Geosciences. 2014. Vol. 66. P. 40—53.
5. Zond geophysical software: official website of the company. Access mode: <http://zond-geo.com> (accessed: 13.07.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Шагарова Н.М. — произвела расчет прямой задачи для всех рассматриваемых моделей, выполнила подготовку данных к инверсии и решение обратной задачи, произвела анализ полученных результатов, подготовила текст статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Куликов В.А. — разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, произвел анализ полученных результатов, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Natalia M. Shagarova — calculated the forward problem for all the considered models, prepared the data for inversion and carried out data inversion, analyzed the results, prepared the text of the article and agrees to assume responsibility for all aspects of the work.

Viktor A. Kulikov — developed the concept of the article, prepared the text of the article, analyzed the results, finally approved the published version of the article and agreed to assume responsibility for all aspects of the work.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ / GEOPHYSICAL METHODS OF PROSPECTING AND EXPLORATION

Алексанова Е.Д. — произвела расчет инверсии и анализ полученных результатов, подготовила текст статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Elena D. Aleksanova — carried out data inversion and analyzed the results, prepared the text of the article and agrees to assume responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шагарова Наталья Максимовна* — аспирантка кафедры геофизических методов исследования земной коры Геологического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; геофизик сервисной геофизической компании ООО «Северо-Запад».
1, тер. Ленинские горы, г. Москва 119991, Россия
9, 1-й Дорожный проезд, г. Москва 117545, Россия
e-mail: nataliashagarova@yandex.ru
тел.: +7 (950) 621-13-04
SPIN-код: 8773-9594
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0437-4103>

Natalia M. Shagarova* — postgraduate student at the Department of Geophysical Methods of Studying the Earth's Crust, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Geophysicist of Nord-West Ltd.
1, ter. Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia
9, 1st Dorozhny travel, Moscow 117545, Russia
e-mail: nataliashagarova@yandex.ru
tel.: +7 (950) 621-13-04
SPIN-code: 8773-9594
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0437-4103>

Куликов Виктор Александрович — доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры Геологического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; главный геофизик сервисной геофизической компании ООО «Северо-Запад».
1, тер. Ленинские горы, г. Москва 119991, Россия
9, 1-й Дорожный проезд, г. Москва 117545, Россия
e-mail: vic@nw-geophysics.ru
SPIN-код: 9748-3801
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0193-2227>

Viktor A. Kulikov — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor of the Department of Geophysical Methods of Studying the Earth's Crust, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Chief Geophysicist of Nord-West Ltd.
1, ter. Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia
9, 1st Dorozhny travel, Moscow 117545, Russia
e-mail: vic@nw-geophysics.ru
SPIN-code: 9748-3801
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0193-2227>

Алексанова Елена Дмитриевна — ведущий геофизик отдела обработки и интерпретации данных сервисной геофизической компании ООО «Северо-Запад».
9, 1-й Дорожный проезд, г. Москва 117545, Россия
e-mail: alex-len@inbox.ru
SPIN-код: 4116-9910
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2533-0175>

Elena D. Aleksanova — Lead Geophysicist of the Data Processing and Interpretation Department of Nord-West Ltd.
9, 1st Dorozhny travel, Moscow 117545, Russia
e-mail: alex-len@inbox.ru
SPIN-code: 4116-9910
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2533-0175>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author