

Геоинформатика. 2024. № 1. С. 42–54.
Geoinformatika. 2024;(1):42–54.

Моделирование геобъектов и геопроцессов

Научная статья
 УДК 550.372
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-1-42-54>

О стабильности разрешения геоэлектрической структуры литосферы в зоне сочленения Тарима и Тянь-Шаня: опыт применения различных подходов к инверсии магнитотеллурических данных

© 2024 г. — Е.Ю. Соколова^{1,2,а)}, Х. Донг³, А.К. Рыбин⁴, П.Ю. Пушкарев⁵, В.Е. Матюков⁴

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт; Россия, Москва

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской Академии Наук; Россия, г. Москва

³ Китайский университет наук о Земле; Китай, Пекин

⁴ Научная станция РАН; Кыргызстан, Бишкек

⁵ Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова; Россия, Москва

^{а)}sokol_1@mail.ru

Аннотация: Внутриконтинентальный Тянь-Шаньский ороген на протяжении несколько десятилетий является полигоном для изучения современных геодинамических и сейсмических процессов, которое проводится российскими и зарубежными учеными на базе Научной станции РАН в г. Бишкек. Исследования имеют большую практическую значимость для выработки стратегий сейсмического районирования. В комплексе применяемых геолого-геофизических методов важную роль играют магнитотеллурические зондирования (МТЗ), поставляющие уникальную информацию о структурах и реологии литосферы.

В статье описывается опыт изучения глубинного геоэлектрического строения зоны сочленения Южного Тянь-Шаня и Таримской плиты, полученный в ходе интерпретации материалов секущего эту зону регионального профиля МТЗ. Сопоставление результатов применения трех подходов к инверсии МТ данных, различающихся как программными реализациями и алгоритмическими основами, так и размерностью, позволяет оценить надежность выделения основных структурных элементов глубинного разреза электропроводности, проявляющих сеймотектоническую модель исследуемого участка земной коры.

В задачи статьи также входила поддержка новых МТ-экспериментов SinoProbe.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, 2D и 3D инверсии, геоэлектрическая структура активных орогенов, Южный Тянь-Шань, Таримская плита

Для цитирования: Соколова Е.Ю., Донг Х., Рыбин А.К., Пушкарев П.Ю., Матюков В.Е. О стабильности разрешения геоэлектрической структуры литосферы в зоне сочленения Тарима и Тянь-Шаня: опыт применения различных подходов к инверсии магнитотеллурических данных // Геоинформатика. — 2024. — № 1. — С. 42–54. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-1-42-54>.

Modeling of geological objects and geoprocesses

Original article

On the stability of the lithospheric geoelectrical structure resolution in Tarim – Tien Shan junction zone: application of various approaches to the magnetotelluric data inversion

© 2024 — E.Yu. Sokolova^{1,2,а)}, H. Dong³, A.K. Rybin⁴, P.Yu. Pushkarev⁵, V.E. Matyukov⁴

¹ All-Russian Scientific Research Geological Petroleum Institute; Russia, Moscow,

² Schmidt's Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of sciences; Russia, Moscow

³ China University of Geosciences; China, Beijing

⁴ Research Station, Russian Academy of sciences; Kyrgyzstan, Bishkek

⁵ Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Russia, Moscow

^{а)}sokol_1@mail.ru

Abstract: For several decades, the intracontinental Tien Shan orogeny has served as a testing polygon for the study of modern geodynamic and seismic processes, carried out by Russian and foreign scientists at the Research Station RAS (Bishkek). The investigations have big practical significance for developing seismic hazard zoning strategies. Magnetotelluric sounding, providing unique information on the lithosphere structures and rheology, plays an important role in the complex of applied geological and geophysical methods.

The article describes the experience of studying the deep geoelectric structure of one of the most seismically active regions of the Tien Shan, the junction zone of the orogen and the Tarim plate. This experience was obtained during the interpretation of materials from the regional profile of MT soundings that cross this zone. Comparing the results of applying three different approaches to the inversion of magnetotelluric data, which differ not only in software implementations and algorithmic foundations, but also in model dimension, allows us to assess the reliability of the allocation and revealed properties of the main structural elements in the deep conductivity section, which help to clarify the seismotectonic pattern of the studied crustal zone. The objectives of the article also included support for new SinoProbe MT experiments.

Key words: magnetotelluric soundings, 2D u 3D inversions, geoelectric structure of active orogens, South Tien Shan, Tarim plate

For citation: Sokolova E.Yu., Dong H., Rybin A.K., Pushkarev P.Yu., Matyukov V.E. On the stability of the lithospheric geoelectrical structure resolution in Tarim – Tien Shan junction zone: application of various approaches to the magnetotelluric data inversion. *Geoinformatika*. 2024;(1):42–54. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-1-42-54>. In Russ.

Введение

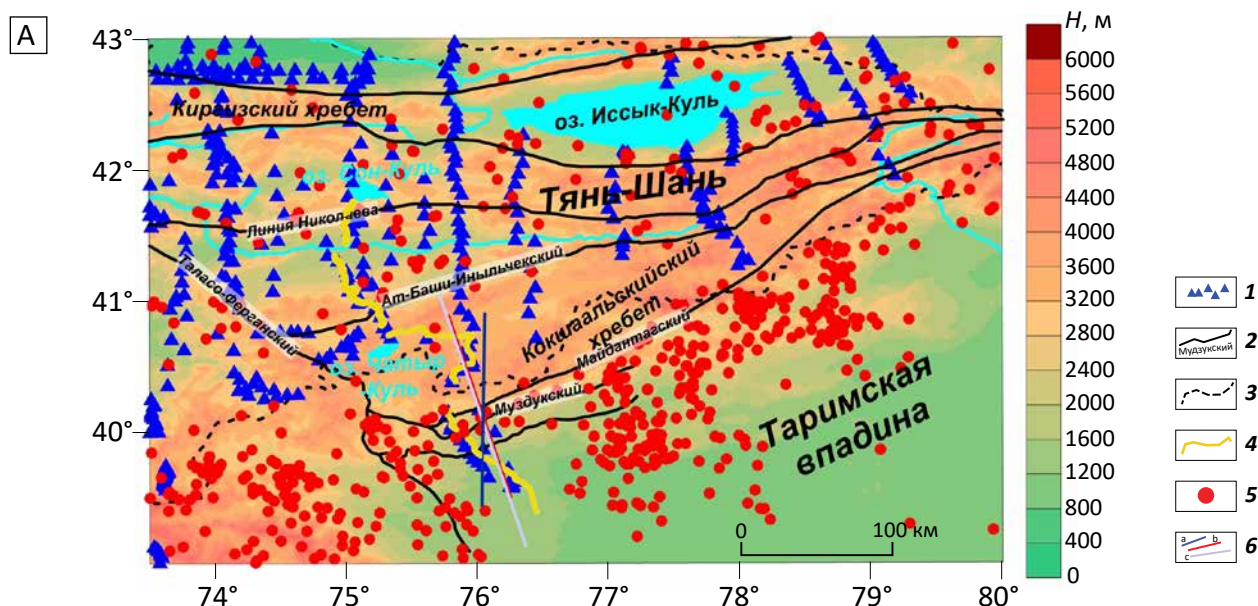
Междисциплинарные геолого-геофизические исследования регионов активного орогенеза существенно расширяют понимание современных геодинамических и сейсмических процессов, необходимое для решения проблем фундаментальной геологии и имеющее большое практическое значение для выявления предвестников землетрясений, а также для выработки стратегий районирования территорий по степени сейсмической опасности. Продолжающий свое воздымание Тянь-Шаньский внутриконтинентальный ороген уже в течение нескольких десятилетий служит идеальным полигоном для подобных исследований. Проводимые российскими учеными на базе Научной станции РАН в г. Бишкек они включают сейсмологический мониторинг, региональные сейсмические эксперименты, а также обширный спектр электромагнитных зондирований [4] (рис. 1). Пассивные и активные профильные сейсмические зондирования

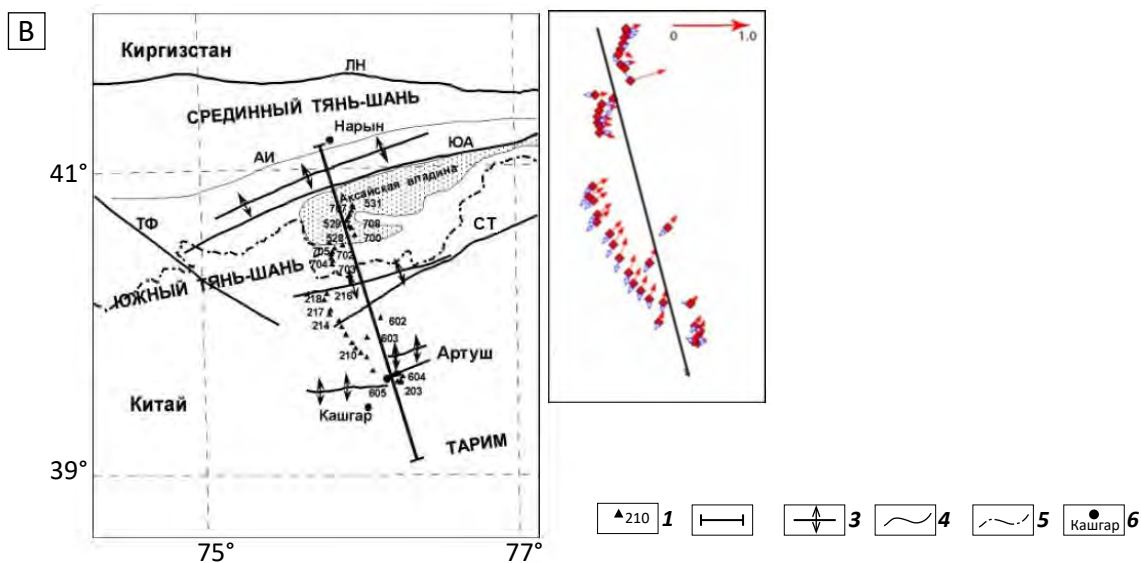
эксперимента Middle AsiaN Active Seismic profiling (MANAS) внесли значительный вклад в изучение зоны сочленения Южного Тянь-Шаня и Таримской плиты — области, которая подверглась интенсивным позднепалеозойским тектоническим движениям, существенно активизировалась в кайнозое в ответ на эоценовую Индо-Евразийскую коллизию и сохранила высокий сейсмогенный потенциал в настоящее время [6, 13, 2]. Результаты эксперимента MANAS продемонстрировали существенное увеличение мощности коры под Южным Тянь-Шанем и дали определенное обоснование представлениям о поддвиге под него Таримской плиты (рис. 2).

Широкополосные и длиннопериодные магнитотеллурические зондирования на профиле Аксай-Артуш (рис. 1В), отвечающем южной части линии MANAS, дополнили сейсмические исследования информацией о геоэлектрических структурах земной коры и верхней мантии [3]. Результаты интерпретации МТ данных, полученные в этой работе с ис-

Рис. 1. Комплексные геофизические наблюдения Научной станции РАН (г. Бишкек) для изучения и мониторинга геодинамических процессов в регионе Центрального Тянь-Шаня (адаптировано по [17, 3, 4])

Fig. 1. Integrated geophysical observations of the Reserchc Station of the Russian Academy of Sciences (Bishkek) for the study and monitoring of geodynamic processes in the Central Tien Shan region (adapted from [17, 3, 4])





А — карта-схема района исследований.

1 — массивы МТ зондирований НС РАН регионе Тянь-Шаня; **2** — региональные тектонических структуры и главные разломы; **3** — граница Киргизской Республики; **4** — сейсмический профиль МАНАС (рис. 2); **5** — эпицентры землетрясений $M > 4$ с 2019 по 2023 год [International Seismological Centre (2019-2023), On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>]; **6** — линии трех геоэлектрических разрезов по магнитотеллурическому профилю Аксай-Артуш, обсуждаемые в тексте (а — 2D-инверсия по программе [16]; б — 2D-инверсия по [14], в — сечение 3D модели)

В — карта-схема района профиля Аксай-Артуш.

1 — пункты МТЗ; **2** — линия геоэлектрического разреза; **3** — оси поднятий; **4** — основные разломы; **5** — граница Киргизии с Китаем; **6** — крупные города. На врезке — действительные (красные) и мнимые (синие) вектора индукции, оцененные в точках зондирований для $T=1000c$ (масштаб задан стрелкой 1.0).

Разломы: АИ — Атбаш-Иныльчекский, СТ — Северо-Таримский (Муздукский), ЛН — линия Николаева, ТФ — Таласо-Ферганский, ЮА — Южно-Атбашинский.

A — a schematic map of the research area.

1 — MT sounding array of the RS RAS in the Tien Shan region; **2** — regional tectonic structures and major faults; **3** — the border of the Kyrgyz Republic; **4** — the seismic profile of MANAS (Fig. 2); **5** — epicenters of earthquakes $M > 4$ from 2019 to 2023 [International Seismological Centre (2019-2023), On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>]; **6** — lines of three geoelectric sections along the Aksai-Artush magnetotelluric profile, discussed in the text (a -the 2D-inversion by the program [16]; b - the inversion by the program [14], c - the section of the 3D model).

B — a schematic map of the Aksai-Artush profile area.

1 — MTS points; **2** — geoelectric section line; **3** — uplift axes; **4** — main faults; **5** — border of Kyrgyzstan with China; **6** — large settlements. The inset shows the real (red) and imaginary (blue) induction vectors estimated at the sounding points for $T = 1000c$ (the scale of the vectors is set by the unit length red arrow).

Faults: AI — Atbashi-Inylchek, ST — Northern-Tarim (Muzduk), LN — Nikolaev line, TF — Talaso-Ferghana, SA — South-Atbashi.

пользованием программы 2D инверсии [14], впервые представили сглаженный геоэлектрический образ разреза зоны сочленения Южного Тянь-Шаня и Таримской плиты (рис. 3), в целом, согласующийся с гипотезой о субдукции последней под Тянь-Шаньский ороген, защищаемой Макаровым и др. (2009).

В настоящей статье описываются результаты применения трех альтернативных подходов к магнитотеллурической инверсии на профиле Аксай-Артуш (различные программные реализации и алгоритмические основы, а также различные аппроксимации и размерности модельной среды). Работа была нацелена на обеспечение большей детальности и надежности разрешения геоэлектрической структуры зоны сочленения тектонических доменов Южного Тянь-Шаня и Тарима для уверенного выделения основных элементов разреза электро-

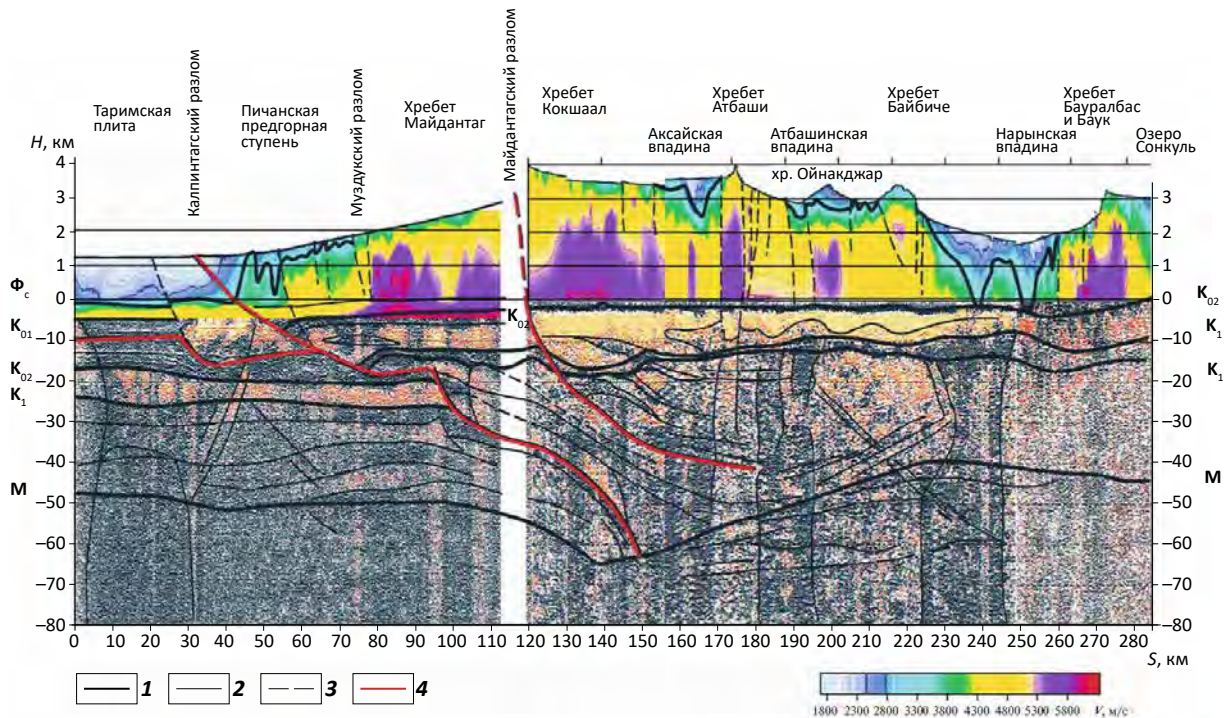
проводности, параметры которых могут свидетельствовать об особенностях теплового и флюидного режимах недр, а также использоваться в качестве весомых ограничений на сеймотектоническую модель земной коры.

Методы и результаты

Зондирования на профиле Аксай-Артуш были выполнены сотрудниками НС РАН совместно с геофизиками из Калифорнийского университета в Риверсайде [3]. В режиме с удаленной базой на рядовых пунктах зондирований измерялись две электрические и три магнитные компоненты естественного электромагнитного поля. Средний шаг по профилю для пяти длиннопериодных зондирований (американские станции LIMS) и 35 широкодиапазонных (с отечественной аппаратурой МТ-24 и канадской — МТУ-5) составил около 3 км. При

Рис. 2. Результаты сейсмического эксперимента "MANAS" [2]: скоростной (сейсмотомография, верхние 5 км) и сейсмодинамический (МОВ-ОГТ, кора и верхняя мантия) разрезы южного участка профиля (положение см рис. 1А).

Fig. 2. The results of the MANAS seismic experiment [2]: seismic velocity (seismic tomography results, upper 5 km) and seismic dynamic (MOV-OGT, crust and upper mantle) sections of the southern segment of the profile (position see in Fig. 1A)



Структурная интерпретация данных МОВ-ОГТ (1–4): 1 — основные структурные границы раздела; 2 — границы латеральных неоднородностей; 3 — разломы в верхней части земной коры; 4 — предполагаемые зоны главных глубинных разломов.

Structural interpretation of the CCP data (1–4): 1 — the main structural boundaries; 2 — the boundaries of lateral inhomogeneous; 3 — faults in the upper crust; 4 — the assumed zones of the main deep faults.

робастной шумоподавляющей обработке были оценены как магнитотеллурические, так и магнитовариационные передаточные функции. Инвариантный анализ тензоров импеданса [1] и поведение индукционных векторов (показаны для периода 1000 с на врезке рис. 1В) характеризовали среду как квазидвумерную при наличии 3D эффектов на отдельных отрезках профиля.

Для инверсии ансамбля данных зондирований на профиле Аксай-Артуш использовалась программа 2D инверсии [14]. Эта программа была одной из первых двумерных программ, получивших широкое распространение в мире с конца 1990-х годов для построения геоэлектрических моделей как при глубинных, так и при поисково-разведочных исследованиях. Прямая задача для продольной и поперечной поляризации электромагнитного поля (ТЕ-моды и ТМ-моды, соответственно) решается методом конечных разностей. При решении обратной задачи используется регуляризация по Тихонову [5] и классический подход сглаживающей инверсии, основанный на методологическом принципе Оккама [8]. Решение доставляется минимизацией функционала, суммирующего среднеквадратичную невязку модельных и наблюдаемых данных со ста-

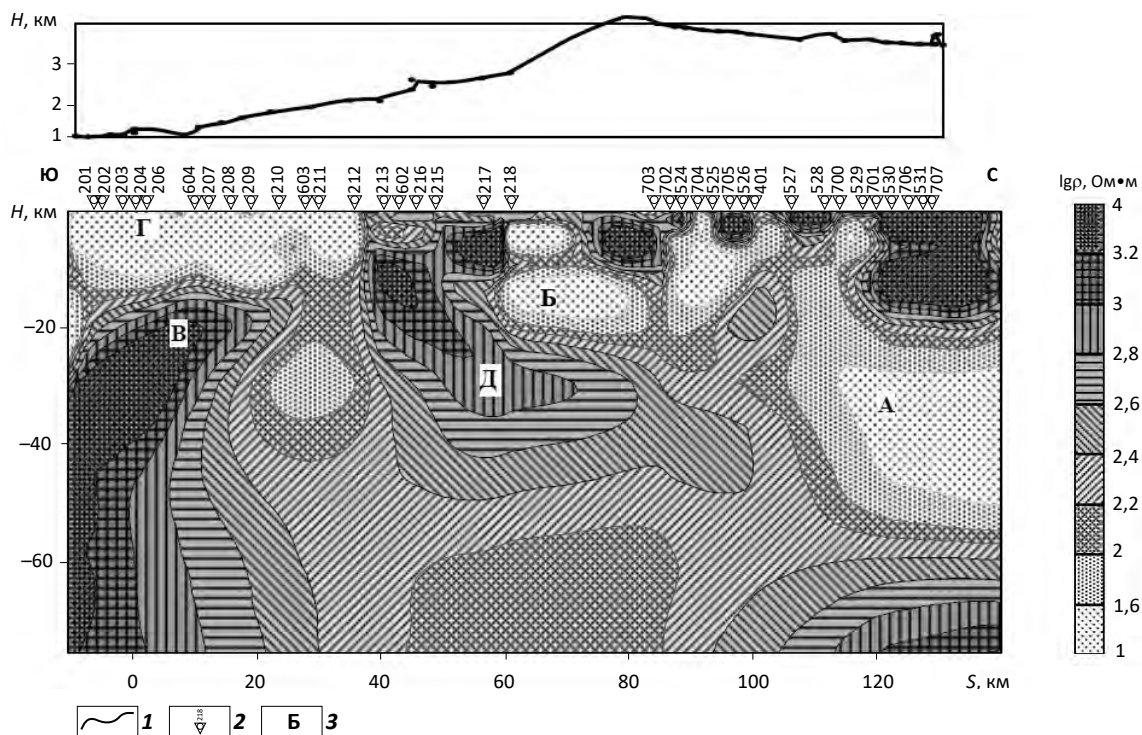
билизатором, отвечающим за сглаживание подбираемой модели. Минимизация композитного функционала осуществляется итерационным методом нелинейного сопряжённого градиента.

В широкополосный бимодальный ансамбль данных для 2D инверсии, охватывающий диапазон 0,01–1600 с, были включены как нормализованные (для учета влияния приповерхностных гальванических искажений) кажущиеся сопротивления и фазы главных импедансов, так и передаточные функции магнитного поля, повернутые в соответствии с направлением профиля (рис. 1В). Модельная сетка учитывала высокогорный рельеф и имела 116 горизонтальных и 115 вертикальных ячеек. Стартовая модель выбиралась как однородное полупространство среднecоровой электропроводности.

В процессе совместной инверсии всего входного массива передаточных функций был получен представленный на рис. 3 разрез, обеспечивающий близость модельных и наблюдаемых данных со среднеквадратичной погрешностью $RMS = 1,49$. Распределение электропроводности в северной части профиля соответствовало известным по предшествующим региональным геоэлектрическим построениям для Центрального Тянь-Шаня пред-

Рис. 3. Геоэлектрический разрез (удельные сопротивления в \lg Ом·м) вдоль профиля Аксай – Артуш, построенный в работе [3] с помощью программы сглаживающей двумерной инверсии [13] (положение линии профиля на рис. 1А)

Fig. 3. Geoelectric section (resistivity in \lg Ohms·m) along the Aksai – Artush profile, constructed in [3] using the program of smoothing two-dimensional inversion [13]



1 — рельеф; **2** — номера пунктов МТЗ; **3** — геоэлектрические структуры, обсуждаемые в тексте.
1 — topography; **2** — MTS numbers; **3** — geoelectric structures discussed in the text.

ставлениям о распространении в средней-нижней коре региона хорошо проводящего слоя. Коррелируемая с этим слоем геоэлектрическая структура А вместе с проводником Б образовала падающую на север до глубины 40–50 км проводящую зону (рис. 3). Вместе с подстилающим ее изолирующим блоком Д они могут рассматриваться как геоэлектрический образ поддвига высокоомной литосферы Тарима под горные хребты Южного Тянь-Шаня вдоль проводящей зоны детachmenta.

Первой альтернативой вышеописанному подходу к интерпретации МТ данных на профиле Аксай-Артуш было применение технологии 2D инверсии с иными алгоритмическими основами и аппроксимацией разреза, имевшее место в рамках одного из проектов РФФИ. Использовался программный комплекс INV2D, который базируется на дискретных параметрических моделях среды с фиксированной геометрией слоев одномерных разрезов на периферии и детально сканируемыми 2D кусочно-непрерывными окнами центральных аномальных областей, допускающими контрасты электропроводности в соседствующих ячейках для повышения разрешающей способности [16, 17]. Соответствующие нелинейные операторы решения

прямых задач аппроксимируются конечно-разностными схемами численного моделирования 2D электромагнитных откликов. Тихоновский регуляризованный подбор параметров модели ведется с помощью современных методов нелинейной ньютоновской минимизации целевого функционала, суммирующего робастную метрику невязки данных и среднеквадратичное отклонение модельных параметров от некоторых априорных представлений о распределении электропроводности. Неустойчивость обратной задачи, возрастающая для сложно построенных сред, снижается дополнительными средствами стабилизации решения: адаптивностью модельной параметризации (нерегулярные сетки), робастной схемой оптимизации и применением априорных весов к входным данным (с учетом их погрешностей, 3D искаженности и чувствительности к интересующим неоднородностям разреза электропроводности).

Инверсия проводилась в соответствии с основным методическим принципам, разработанными в ИФЗ РАН и НС РАН [15; 4] для преодоления общих проблем интерпретации высокогорных МТ данных (нерегулярные сети наблюдений, эффекты рельефа, сильная приповерхностная и глубинная

неоднородность распределения электропроводности). Разрез электропроводности описывался 1025 параметрами, оцениваемыми для соответствующих ячеек нерегулярной модельной сетки с учетом рельефа. Входными данными служили наборы значений сопротивлений и фаз главных импедансов (в направлениях выбранной линии профиля — вдоль 76°ВД, синяя линия на рис. 1) на 15 периодах из диапазона 0,125–724 с. В приграничной, наиболее высокогорной зоне, где наблюдения отсутствовали, данные были проинтерполированы («false» точки 218d, 525d). Специальная стратегия взвешивания подавляла влияние приповерхностных и 3D-искажений в различных компонентах данных (штрафные санкции за 3D-эффекты) и подчеркивала вклад длиннопериодных данных и фаз импеданса — более двумерного и гальванически неискаженного подмножества данных. Модель, полученная в результате проведения последовательных частичных и многокомпонентных МТ инверсий сформированного квази-двумерного ансамбля представлена на рис. 4А (полная RMS=1,87). Рисунок 4В демонстрирует согласование наблюдаемых и рассчитанных в итоговой модели фазовых компонент данных с указанием медианных значений частичных невязок их подбора.

Выявлены следующие особенности литосферы зоны сочленения Тарима и Тянь-Шаня:

- переслаивание проводящих и высокоомных слоев осадочного чехла Тарима;
- наличие у подножья хребтов падающей под достаточно крутым углом зоны с низким удельным сопротивлением, далее к северу существенно выполаживающейся;
- наличие в средней коре Южного Тянь-Шаня проводящих зон/слоев и локальных проводящих линз, соответствующих понижениям скоростей на сейсмических изображениях (рис. 4А);
- проводящий слой в основании коры / в верхней мантии под Южным Тянь-Шанем.

Третий вариант подхода к инверсии МТ данных зоны сочленения Тарима и Тянь-Шаня был реализован уже в рамках настоящего исследования и заключался в применении 3D кода [10], имеющего базой наиболее популярную в настоящее время программу для 3D МТ инверсии — ModEM [12], наследующую идеологию оккамовской сглаживающей инверсии [8, 10]. Модульная структура кода позволяет довольно легко добавлять в него модули, выполняющие новые функции (зондирования с контролируемым источником и др.) или более эффективно реализующие уже имеющиеся. В работе [10] предложено и опробовано усовершенствование вычислений, связанное с использованием условия бездивергентности поля, позволяющее ускорять получение достаточно точного решения прямой 3D задачи

электродинамики. Более эффективное вычисление чувствительностей дает этой реализации 3D инверсии МТ данных существенные преимущества по быстрой работе.

Объемная модель удельного сопротивления области исследования, демонстрируемая на рис. 5, представляет собой актуальный результат 3D инверсии массива данных МТ зондирования в полосе профиля Аксай-Артуш. Она была построена на детальной пространственной модельной сетке в ходе подбора всех четырех компонент комплексных импедансов в широком диапазоне всех периодов оценивания для каждого конкретного зондирования (широкополосного либо длиннопериодного). Входные погрешности оценивались на уровне 2,5 % (error flow). Итоговая RMS = 1,89.

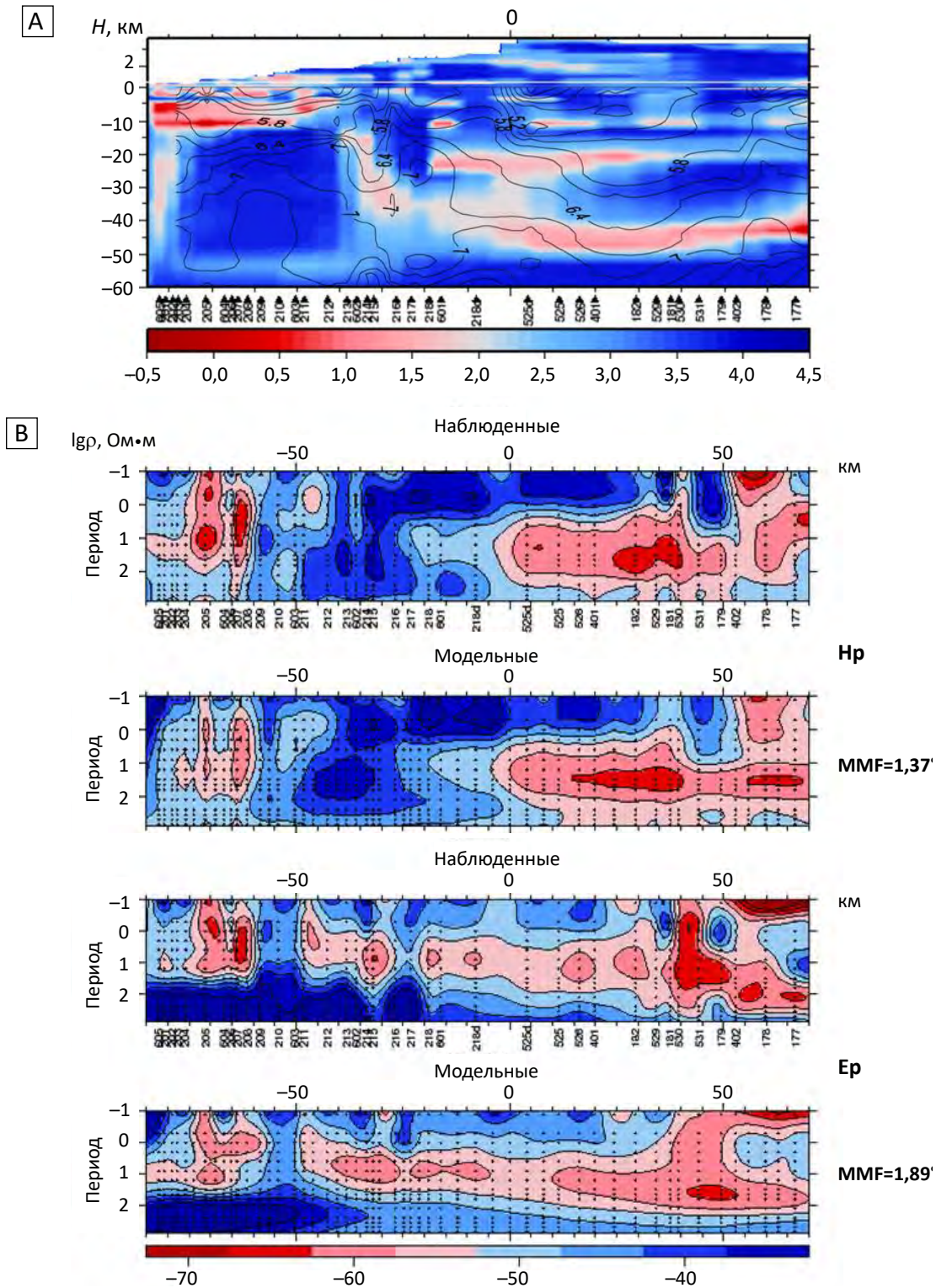
На рис. 5 модель представлена горизонтальными и вертикальным сечениями, которые детализируют неоднородности как высокоомной (в целом) верхней коры Южного Тянь-Шаня, так и проводящего осадочного чехла Тарима. Под орогеном выявляется существенно более проводящая средняя кора (глубины 15–20 км, вмещающие также ряд внепрофильных низкоомных объектов) с фиксируемым в сечениях погружением проводников к северу.

Обсуждение

Сложное строение складчатых высокогорных областей, в том числе Тянь-Шаня, предъявляет особые требования к применяемым геофизическим методам, включающие детальные сетки наблюдений и помехоустойчивую обработку, эффективный анализ данных для определения их искажений и итогового выбора размерности интерпретационной модели и, наконец, применение инструментов инверсии, в идеале демонстрирующих баланс стабильности и детальности разрешения глубинной структуры. Основные усилия текущего раунда анализа данных зондирования Аксай-Артуш были направлены на оценку возможности добиться на имеющемся материале улучшенного разрешения сложной геотрической структуры литосферы в зоне сочленения Южного Тянь-Шаня и Тарима, а также определить существенные особенности разреза электропроводности, выявляемые наиболее надежно.

Применение программы инверсии INV2D, опирающейся на так называемую кусочно-непрерывную модельную аппроксимацию геотрической среды [16] и постановку задачи оптимизации, отличную от используемой первоначально в [4] сглаживающей парадигмы, позволило получить определенный прогресс в детальности разрешения разреза (от модели рис. 3 к модели рис. 4). Так, если мощность осадочного чехла Таримской плиты оценивается обеими программами примерно одинаково (около 10 км), то при применении INV2D структура его электропроводности значительно уточняется,

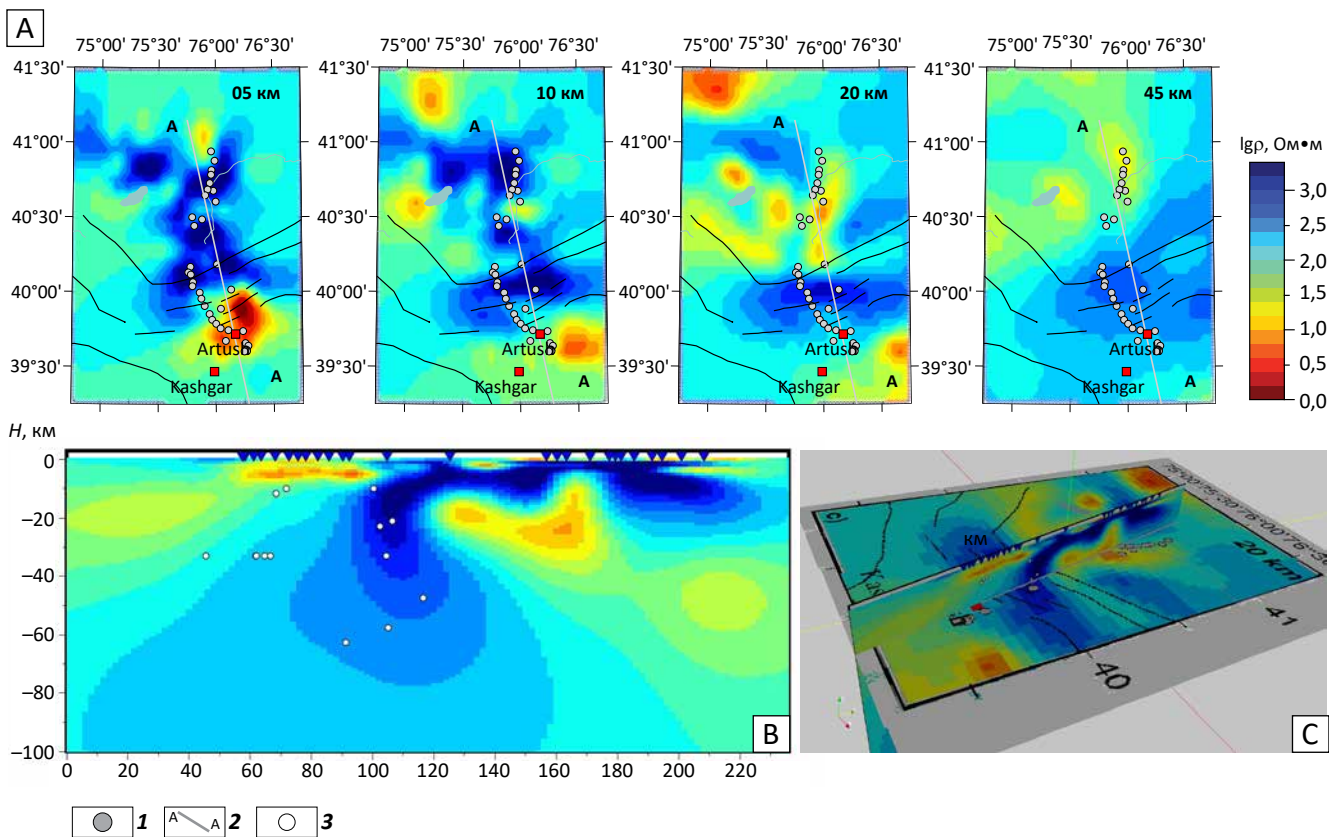
Рис. 4. Результаты двумерной инверсии МТ данных профиля Аксай-Артуш по программе [16] (положение см. на рис. 1А)
 Fig. 4. The results of two-dimensional MT inversion of Aksai-Artush profile data using the program [16] (see position in Fig. 1A)



A — итоговый разрез удельного сопротивления (согласно цветовой шкале в $\text{lg Ом} \cdot \text{м}$) с наложенными изолиниями V_p (км/с) (по скоростной сейсмической модели [6]).
B — псевдоразрезы наблюдаемых и модельных фаз главных импедансов (H_p и E_p , для поперечной и продольной поляризаций, соответственно) согласно цветовой шкале (в градусах) и соответствующие медианные оценки невязок (MMF).
A — the final resistivity section (according to the color scale in $\text{lg Ohms} \cdot \text{m}$) with superimposed V_p isolines (km/s) (according to the seismic velocity model [6]).
B — the pseudo-sections of the observed and model phases of the main impedances (H_p and E_p , for transverse and longitudinal polarizations, respectively) according to the color scale (in degrees) and corresponding median misfits (MMF).

Рис. 5. Результаты 3D-инверсии данных МТЗ Аксай-Артуш, полученные с применением кода [10]

Fig. 5. The results of 3D-inversion of MTS Aksai-Artush data obtained using the code [10]



A — горизонтальные срезы объемной модели удельного сопротивления на различных глубинах. **B** — вертикальное сечение объемной модели (вдоль линии А—А, изображенной на (A) и на рис.1). **C** — пространственный монтаж вертикального сечения 3D-модели вдоль линии А—А и горизонтального на глубине 20 км (вид с юго-востока).

1 — пункты использованных МТ зондирований; **2** — линия сечения; **3** — гипоцентры сильных землетрясений в некоторой ближайшей полосе профиля

A — horizontal sections of the 3D resistivity model at various depths. *B* — the vertical section of the 3D resistivity model (along the A—A line shown in (A) and in Fig.1). *C* — the spatial installation of the vertical section of the 3D model along the A—A line and the horizontal one at a depth of 20 km (view from the southeast).

1 — the sites of the MT soundings used in the inversion; **2** — the cross-section line; **3** — the hypocenters of strong earthquakes in a certain near band of the profile

позволяя выделить наиболее проводящую толщу в основании и вышележащие изоляторы. Отчетливо выделяющийся глубинный наклонный проводник у подножья хребтов, может трактоваться как свидетельство поддвига (или деляминации, как предложено в [13]) Таримской плиты. Полученное в разрезе удельного сопротивления (рис. 4A) разрешение проводящих зон/слоев средней коры и локальных проводящих линз коррелирующих с зонами понижения скорости на сейсмических изображениях свидетельствует о флюидной природе аномалий обоих видов (минерализованные водные флюиды/частичный расплав?). Стоит отметить, что в работе [6] предполагается, что аномалии сейсмической скорости демонстрируют реологическое расслоение и присутствие камер частичного расплава. Существенную сложность для реализации преиму-

ществ данного подхода представляло отсутствие точек наблюдений на значительном (почти 30 км) высокогорном отрезке профиля. Все элементы достигнутой детализации геоэлектрического разреза могут нести важную интерпретационную нагрузку, однако, все еще нуждаются в строгой, количественной, оценке разрешающей способности.

Переход к 3D-инверсии, результаты которого показаны на рис. 5, позволил описать 3D характеристики, выявляемые в наблюдаемых данных, за счет адекватного подбора неоднородностей лежащих вне профиля. Построенное объемное распределение электропроводности дало возможность значительно уточнить особенности конкретного изучаемого разреза в верхней коре. В осадочном чехле Таримской плиты, как и в результате INV2D инвер-

сии, выделены и проводники, и изоляторы, но при этом заметно откорректирована его мощность (не более 8 км). Чувствительность «по-латерали» при 3D-инверсии квази-профильных данных довольно ограничена, однако, наиболее крупные проводящие структуры в широком модельном охвате региона рассматриваемого профиля были выявлены. Так, аномалия проводимости под Нарынской впадиной, известная по предшествующим работам [15, 4], проявилась и в 3D-подборе по данным зондирований Аксай-Артуш (яркая структура на СЗ планшетов со срезами модели на глубинах 10 и 20 км). При этом весьма обширная осадочная депрессия Тарима, по видимому, дала ложный эффект глубинной проводящей зоны (20–30 км) на южном фланге объемной модели.

МТ данные профиля Аксай-Артуш инвертировались в «несколько рук» — разными интерпретаторами (соавторами статьи) — с использованием различных инструментов МТ инверсии, а также в значительной степени разнящихся наборов входных данных и проекций наблюдений на линию профиля. Это позволяет говорить о независимости полученных оценок и о возможности делать заключение о надежности разрешения геоэлектрических структур зоны сочленения, выделяемых на всех трех полученных разрезах.

Рисунок 6, сопоставляющий 2D-разрез [3] и сечение по линии этого профиля (см. рис. 1) объемной модели, построенной в рамках настоящего исследова-

ния, выявляет эти структурные элементы: проводящий в целом чехол Таримской плиты и более высокоомный фундамент под ним; высокоомную, с локальными проводящими неоднородностями, верхнюю кору под Южным Тянь-Шанем; коровый клиновидный блок-изолятор в области сочленения плиты и орогена и пологую неоднородно проводящую структуру на его верхней кромке, погружающуюся на север и переходящую в верхнемантийный проводник на самом северном окончании профиля. В целом, они проявляются и в результатах 2D-инверсии (INV2D), показанных на рис. 4 (за исключением плохо разрешенной области отсутствия данных в высокогорном приграничье).

Благодаря пространственному учету внепрофильных неоднородностей, объемная модель надежно, с большей детальностью, чем аналогичная (сглаженная) 2D, разрешает верхнюю кору, хорошо согласуясь с последней уже на глубинах средней коры (рис. 6).

В целом, основные элементы сечения построенной 3D модели удельного сопротивления вполне соответствуют базовыми структурным характеристикам зоны сочленения Тарима и Тянь-Шаня, выявляемым в сейсмических образах [2]. На пространственном монтаже разреза этой модели и разреза МОВ-ОГТ (рис. 7) красными пунктирными линиями обозначены: предполагаемая зона детачмента (падающая к северу геоэлектрическая зона высокой проводимости) и Майдантагский разлом (крутое

Рис. 6. Сечение объемной модели удельного сопротивления вдоль линии А-А (рис. 5) в соответствии с цветовой шкалой, с наложенным полупрозрачным геоэлектрическим разрезом, полученным в [3]

Fig. 6. The cross section of the volumetric resistivity model along A-A line (Fig.5) in accordance with the color scale, with a superimposed translucent grey geoelectric section obtained in [3]

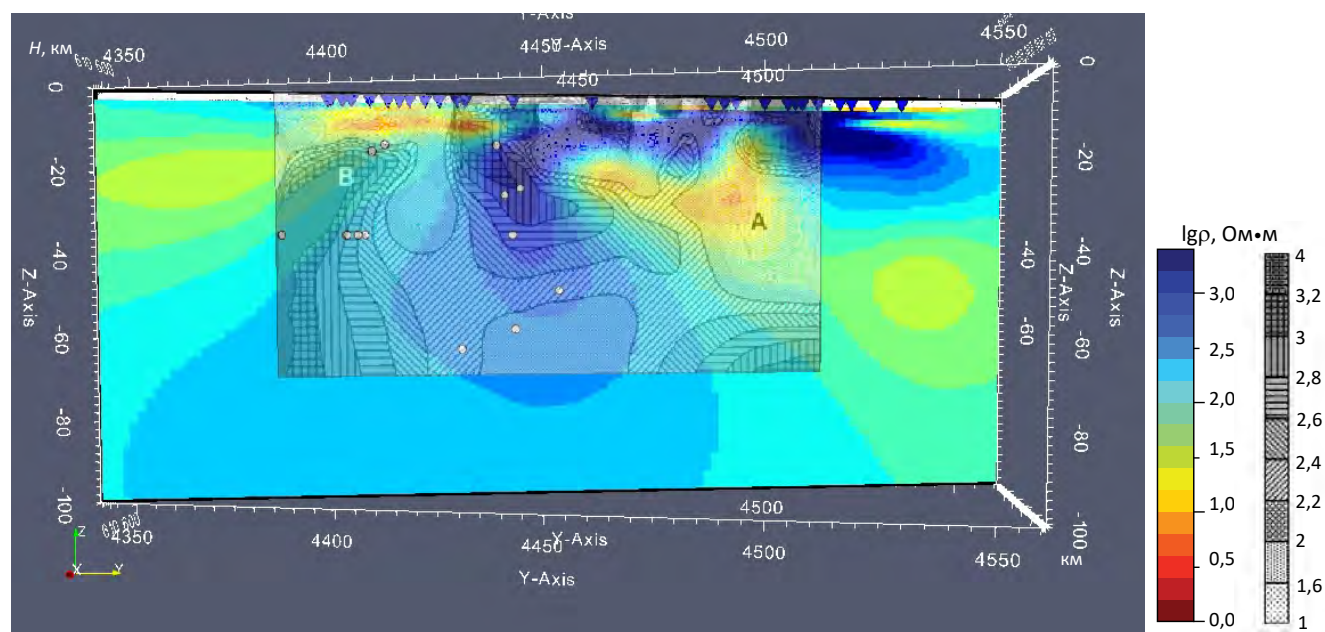
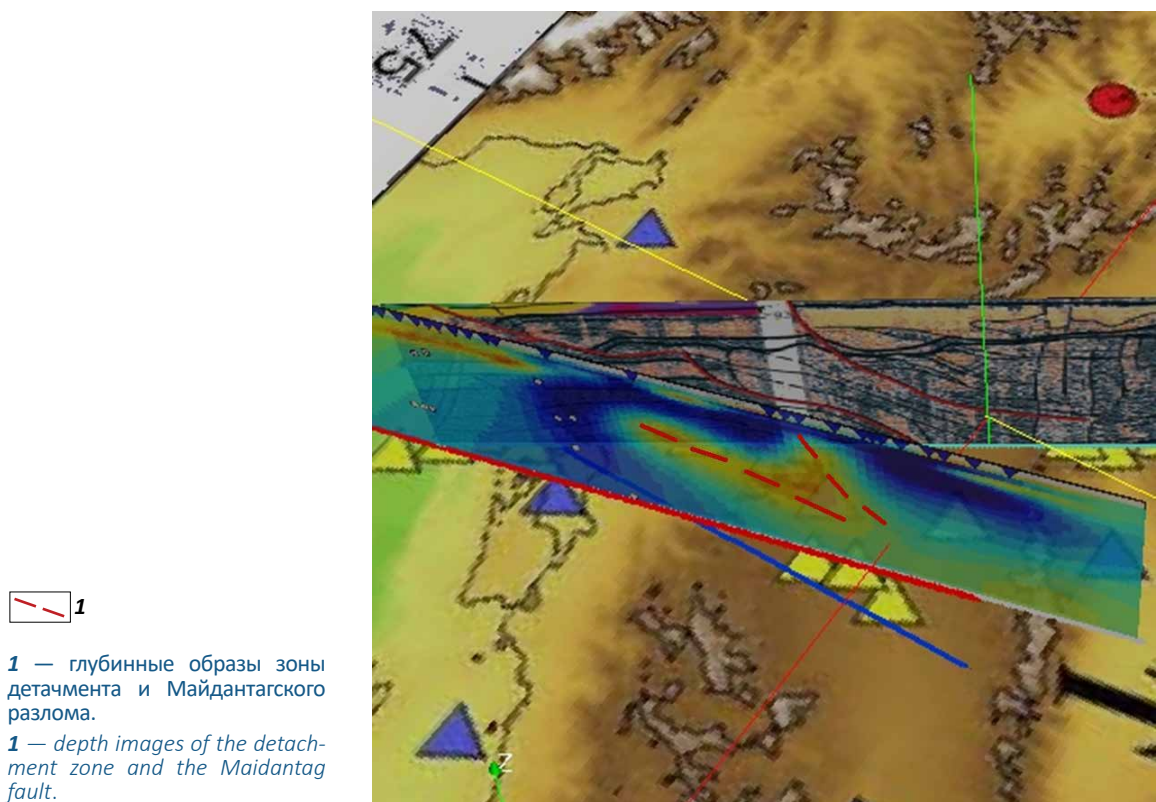


Рис. 7. Пространственный монтаж разреза объемной геоэлектрической модели вдоль линии профиля Аксай-Артуш (положение см. на рис. 1А) и сейсמודинамического разреза МОВ-ОГТ эксперимента MANAS с элементами его интерпретации [2]
Fig. 7. Spatial installation of the volumetric geoelectric model section along the Aksai-Artush profile line (see position in Fig. 1A) and the seismic dynamic section of the MANAS CCP experiment with elements of its interpretation in [2]



падение соответствующего проводника). Как было показано, их образы, стабильно проявлены в результатах применения различных подходов к интерпретации МТ данных.

Следует также отметить, что итоговая 3D-модель, в согласии с предшествующими двумерными, выявляет корреляцию распределения сейсмичности земной коры исследуемой зоны с высокоомными (консолированными) блоками или их участками, расположенными вблизи проводящих структур (рис. 5, 6).

Заключение

На примере Южного Тянь-Шаня продемонстрированы определенные перспективы увеличения разрешающей способности магнитотеллурических инверсий при изучении геоэлектрической структуры сложно построенных складчатых поясов. Пути их реализации связаны с переходом от сглаживающих 2D-инверсий к инверсиями в контрастных кусочно-непрерывных моделях среды, а также — к 3D-постановкам.

Трудно ожидать, что новые полевые работы в зоне сочленения Тарима и Тянь-Шаня смогут заполнить пробелы в сетке наблюдений на макси-

мальных топографических высотах, что позволило бы реализовать все преимущества кусочно-непрерывной параметризации модели для детального восстановления геоэлектрического разреза. Приоритетным представляется использование современных эффективных программ 3D-инверсии, которое при пространственном расширении массива зондирования позволит более точно восстановить разрез изучаемой зоны и проследить его латеральные изменения. Дополнительные пространственные длиннопериодные данные необходимы для достижения большей разрешающей способности инверсий в области нижней коры Южного Тянь-Шаня (достигающей толщины 50–60 км) и верхней мантии под Таримской плитой, реология которых во многом определяет протекание региональных геодинамических процессов.

Наиболее продвинутым решением обратной задачи по МТ данным, имеющимся в зоне сочленения Тарима и Тянь-Шаня на сегодня, следует считать полученное в результате применение 3D инверсии, наилучшим образом восстановившей глубинный разрез электропроводности по линии Аксай-Артуш. Наличие под Южным Тянь-Шанем крупного наклонного линейамента с низким удель-

ным сопротивлением является самой яркой и стабильно разрешимой особенностью разреза по результатам интерпретации МТ данных, полученным тремя различными методами (с использованием 2D и 3D подходов и различных наборов данных). Эту аномалию удельного сопротивления можно связать с зоной флюидизированного (и/или проработанного минерализацией) detachment/поддвига тектонической плиты Тарима под Южно-Тянь-Шаньский ороген, что дает независимую верификацию существующим гипотезам о строении литосферы этого коллизионного пояса, ранее основанных, главным образом, на сейсмических данных [2].

Все три геоэлектрические разреза демонстрируют кластеризацию гипоцентров землетрясений в высокоомных (консолидированных) блоках земной коры или же в зонах их контактов с проводящими структурами.

В задачи статьи также входила поддержка планирования новых фаз МТ-эксперимента проекта SinoProbe — китайской междисциплинарной программы исследований в области наук о Земле, целью которой является выявление состава, строения и эволюции континентальной литосферы Китая, включая области Таримской плиты и Тянь-Шаньского орогена [9, 11].

Благодарим разработчиков ГИС Integro [7] за возможность ее использования при подготовке некоторых рисунков.

Список источников

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
2. Макаров В.И., Алексеев Д.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Беляев И.В., Брагин В.Д., Дергунов Н.Т., Ефимова Н.Н., Леонов М.Г., Мунирова Л.М., Павленкин А.Д., Рёкер С.В., Рослов Ю.В., Рыбин А.К., Щелочков Г.Г. Поддвиг Тарима под Тянь-Шань и глубинная структура зоны их сочленения: основные результаты сейсмических исследований по профилю MANAS (Кашгар-Сонкель) // Геотектоника. – 2010. – № 2. – С. 23–42.
3. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Магнитотеллурические свидетельства глубинных геодинамических условий в зоне сочленения южного Тянь-Шаня и Таримской впадины // Записки горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 272–276.
4. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Непейна К.С., Матюков В.Е. Объемно-пространственная сегментация литосферы Тянь-Шаня по данным геофизических исследований // Геодинамика и тектонофизика. – 2021. – Т. 12. – № 3. – С. 508–543. DOI:10.5800/GT-2021-12-3-0537.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 285 с.
6. Щелочков Г.Г., Брагин В.Д., Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Павленкин А.Д., Рослов Ю.В., Ефимова Н.Н., Дергунов Н.Т., Беляев И.В., Мунирова Л.М., Макаров В.И., Леонов М.Г., Алексеев Д.В., Кларр Ж.Н., Роекер С.В. Трансект «MANAS»: первые результаты обработки и интерпретации данных сейсмических Центрального Тянь-Шаня // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы: сб. материалов четвертого международного симпозиума (15–20 июня 2008 года, Бишкек). – М.: Бишкек, [б. и.] 2009. – С. 59–67.
7. Черемисина Е.Н., Финкельштейн М.Я., Деев К.В., Большаков Е.М. ГИС INTEGRO. Состояние и перспективы развития в условиях импортозамещения // Геология нефти и газа. – 2021. – № 3. – С. 31–40. DOI 10.31087/0016-7894-2021-3-31-40.
8. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // Geophysics. – 1987. – Vol. 52. – Iss. 3. – pp. 289–300. DOI: 10.1190/1.1442303.
9. Dong S.W., Li T.D., Lü Q.T., Gao R., Yang J.S., Chen X.H., Wei W.B., Zhou Q. Progress in deep lithospheric exploration of the continental China: A review of the SinoProbe // Tectonophysics. – 2013. – Vol. 606. – pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.05.038.
10. Dong H., Egbert G.D. Divergence-free solutions to electromagnetic forward and adjoint problems: a regularization approach // Geophysical Journal International. – 2019. – Vol. 216. – Iss. 2. – pp. 906–918. DOI: 10.1093/gji/ggy462.
11. Dong H., Wei W., Jin S., Ye G. Magnetotellurics in SINOPROBE Project: an Overview [Электронный ресурс]. – 16.12.2020. – 38 p. Режим доступа: http://www.mtnet.info/EMinars/20201216_Dong_EMinar.pdf (дата обращения: 20.03.2024).
12. Kelbert A., Meqbel N., Egbert G.D., Tandon K. ModEM: a modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // Computers & Geosciences. – 2014. – Vol. 66. – pp. 40–53. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.01.010.
13. Li Zh., Roeker S., Zhihai L., Bin W., Haitao W., Schelochkov G., Bragin V. Tomographic image of the crust and upper mantle beneath the western Tien Shan from MANAS broadband deployment: possible evidence for lithospheric delamination // Tectonophysics. – 2009. – Vol. 477. – Iss. 1-2. – pp. 49–57. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.05.007.
14. Rodi W., Mackie R.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // Geophysics. – 2001. – Vol. 66. – Iss. 1. – pp. 174–187. DOI: 10.1190/1.1444893.
15. Sokolova E.Yu., Berdichevsky M., Varentsov I., Rybin A., Baglaenko N., Batalev V., Golubtsova N., Matukov V., Pushkarev P. Advanced methods for joint MT/MV profile studies of active orogens. The experience from the Central Tien Shan // Protokoll uber das 22 Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung" / Eds. O. Ritter, H. Brasse. – Potsdam; DGG, 2007. – pp. 132–141.
16. Varentsov I.M. Joint robust inversion of magnetotelluric and magnetovariational data // Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior / ed. V.V. Spichak. – Amsterdam: Elsevier, 2007. – pp. 189–222. DOI: 10.1016/S0076-6895(06)40008-1.
17. Varentsov I.M., Sokolova E.Yu., Baglaenko N.V. 2D inversion resolution in the Emtesz-Pomerania project: data simulation approach // Protokoll uber das 22 Kolloquium "EM Tiefenforschung" / Eds. O. Ritter, H. Brasse. – Potsdam; DGG, 2007. – pp. 143–150. DOI: 10.13140/RG.2.1.3661.7842.

References

1. *Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I.* Models and methods of magnetotellurics. Berlin; Heidelberg: Springer; 2008. 680 p.
2. *Makarov V.I., Alekseev D.V., Leonov M.G., Batalev V.Y., Bataleva E.A., Bragin V.D., Rybin A.K., Shchelochkov G.G., Belyaev I.V., Dergunov N.T., Efimova N.N., Roslov Y.V., Munirova L.M., Pavlenkin A.D., Roecker S.* Underthrusting of Tarim beneath the Tien Shan and Deep Structure of Their Junction Zone: Main Results of Seismic Experiment along MANAS Profile Kashgar-Song- Köl. *Geotectonics*. 2010;44(2):102–126. DOI: 10.1134/S0016852110020020.
3. *Rybin A.K., Batalev V.Y., Bataleva E.A., Matukov V.E.* Magnetotelluric evidence of deep geodynamic settings at the junction zone of the southern Tien Shan and Tarim basin. *Journal of Mining Institute*. 2009;183:272–286.
4. *Rybin A.K., Bataleva E.A., Nepeina K.S., Matyukov V.E.* Volumetric and spatial segmentation of the Tien Shan lithosphere according to geophysical data. *Geodynamics and tectonophysics*. 2021;12(3):508-543. DOI:10.5800/GT-2021-12-3-0537.
5. *Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya.* Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods of solving ill-posed problems]. 2nd ed. Moscow: Nauka; 1979. 285 p.
6. *Shchelochkov G.G., Bragin V.D., Rybin A.K., Batalev V.YU., Bataleva E.A., Pavlenkin A.D., Roslov YU.V., Efimova N.N., Dergunov N.T., Belyaev I.V., Munirova L. M., Makarov V.I., Leonov M. G., Alekseev D.V., Knapp J.H., Roecker S.W.* Transekt «MANAS»: pervye rezul'taty obrabotki i interpretatsii dannykh seismicheskikh Tsentral'nogo Tyan'-Shanya [Transect "MANAS": first results of processing and interpretation of seismic data of the Central Tien Shan] In: *Geodinamika vnutrikontinental'nykh orogenov i geohkologicheskie problemy : sb. materialov chetvertogo mezhdunarodnogo simpoziuma (15-20 June 2008, Bishkek)*. Moscow; Bishkek; [s.n.] 2009. pp. 59–67.
7. *Cheremisina E.N., Finkel'shtein M.Ya., Deev K.V., Bol'shakov E.M.* GIS INTEGRO. Status and prospects for development in the context of import substitution. *Russian oil and gas geology*. 2021;(3):31–40. DOI 10.31087/0016-7894-2021-3-31-40.
8. *Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G.* Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*. 1987;52(3):289–300. DOI: 10.1190/1.1442303.
9. *Dong S.W., Li T.D., Lü Q.T., Gao R., Yang J.S., Chen X.H., Wei W.B., Zhou Q.* Progress in deep lithospheric exploration of the continental China: A review of the SinoProbe. *Tectonophysics*. 2013;606:1–13. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.05.038.
10. *Dong H., Egbert G.D.* Divergence-free solutions to electromagnetic forward and adjoint problems: a regularization approach. *Geophysical Journal International*. 2019;216(2):906–918. DOI: 10.1093/gji/ggy462.
11. *Dong H., Wei W., Jin S., Ye G.* Magnetotellurics in SINOPROBE Project: an Overview. 16.12.2020. 38 pp. Available at: http://www.mtnet.info/EMinars/20201216_Dong_EMinar.pdf (accessed 20.03.2024).
12. *Kelbert A., Meqbel N., Egbert G.D., Tandon K.* ModEM: a modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. *Computers & Geosciences*. 2014;66:40–53. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.01.010.
13. *Li Zh., Roeker S., Zhihai L., Bin W., Haitao W., Schelochkov G., Bragin V.* Tomographic image of the crust and upper mantle beneath the western Tien Shan from MANAS broadband deployment: possible evidence for lithospheric delamination. *Tectonophysic*. 2009;477(1-2):49–57. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.05.007.
14. *Rodi W., Mackie R.L.* Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*. 2001;66(1):174–187. DOI: 10.1190/1.1444893.
15. *Sokolova E.Yu., Berdichevsky M., Varentsov I., Rybin A., Baglaenko N., Batalev V., Golubtsova N., Matukov V., Pushkarev P.* Advanced methods for joint MT/MV profile studies of active orogens. The experience from the Central Tien Shan. In: *Protokoll uber das 22 Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung"*. Ritter O., Brasse H., eds. Potsdam; DGG; 2007. pp. 132–141.
16. *Varentsov I.M.* Joint robust inversion of magnetotelluric and magnetovariational data. In: *Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior*. Spichak V., ed. Amsterdam: Elsevier; 2007. pp. 189–222. DOI: 10.1016/S0076-6895(06)40008-1.
17. *Varentsov I.M., Sokolova E.Yu., Baglaenko N.V.* 2D inversion resolution in the Emsz-Pomerania project: data simulation approach. In: *Protokoll uber das 22 Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung"*. Ritter O., Brasse H., eds. Potsdam; DGG; 2007. pp. 143–150. DOI: 10.13140/RG.2.1.3661.7842.

Статья поступила в редакцию 20.01.2023, одобрена после рецензирования 08.02.2024, принята к публикации 19.03.2024.
The article was submitted 20.01.2023; approved after reviewing 08.02.2024; accepted for publication 19.03.2024.

Информация об авторах

Соколова Елена Юрьевна

Ведущий научный сотрудник отделения Геоинформатики
ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский
геологический нефтяной институт»
117105 Москва, Варшавское ш., д. 8
Ведущий научный сотрудник
ФГБУН Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта
123242 Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1
e-mail: sokol_l@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5788-6944

Information about authors

Elena Yu. Sokolova

Leading Researcher, Department of Geoinformatics
All-Russian Research Geological Petroleum Institute
8, Varshavskoye sh., Moscow, 117105, Russia
Leading Researcher
Schmidt's Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of
Sciences
buildi. 1, 10 Bolshaya Gruzinskaya str., Moscow, 123242, Russia
e-mail: sokol_l@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5788-6944

Донг Хао

Доцент

Китайский университет наук о Земле (Пекин)

100083 Пекин, Haidian District, Xueyuan Road

e-mail: donghao@cugb.edu.cn

ORCID: 0000-0002-5457-0557

Рыбин Анатолий Кузьмич

Директор, главный научный сотрудник

ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкек

720049 Киргизстан, Бишкек-49, Научная станция РАН

e-mail: rybin99@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-7810-3278

Пушкарев Павел Юрьевич

Профессор

Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

119234 Москва, Ленинские горы, д. 1

e-mail: pavel_pushkarev@list.ru

ORCID: 0000-0003-2894-26098

Матюков Виталий Евгеньевич

Старший научный сотрудник

ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкек

720049 Киргизстан, Бишкек-49, Научная станция РАН

e-mail: vitaliy_cowboy@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5323-786X

Hao Dong

Associate professor

China University of Geosciences

Xueyuan Road, Beijing, Haidian District, 100083, China

e-mail: donghao@cugb.edu.cn

ORCID: 0000-0002-5457-0557

Anatoly K. Rybin

Director, Chief Researcher

Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek

Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek-49,
720049, Kyrgyzstan

e-mail: rybin99@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-7810-3278

Pavel Yu. Pushkarev

Professor

Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty

1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russia

e-mail: pavel_pushkarev@list.ru

ORCID: 0000-0003-2894-2609

Vitaly E. Matyukov

Senior Researcher

Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek

Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek-49,
720049, Kyrgyzstan

e-mail: vitaliy_cowboy@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5323-786X