

УДК 550.37
DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4652
Шифр специальности ВАК: 25.00.10
Научная статья

Комплексирование электроразведочных методов при поисках рудоконтролирующих структур в условиях Турунтаевской рудной зоны (Томская область)

А.А. Заплавнова^{1✉}, В.В. Оленченко^{1,3}, Е.В. Поспеева¹, П.С. Осипова¹, Б.Б. Логутов²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук, Россия, г. Новосибирск

² Общество с ограниченной ответственностью «Инерт-Строй», Россия, г. Томск

³ Новосибирский государственный университет, Россия, г. Новосибирск

✉ ZaplavnovaAA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Актуальность. Перспективы расширения минерально-сырьевой базы в настоящее время связаны с поиском месторождений «скрытого типа», не имеющих выхода на поверхность. Для таких объектов характерны большие мощности перекрывающих отложений, достигающие 100 и более метров. Проведение поисковых геофизических работ в подобных условиях является не всегда результативным из-за неправильно подобранного комплекса методов и несоблюдения стадийности исследований. Одним из возможных способов поиска таких объектов является выявление глубинной рудоконтролирующей структуры при мелкомасштабных поисках с последующей детализацией верхней части разреза крупномасштабными исследованиями. **Цель.** Получение новых знаний о строении Турунтаевской рудной зоны с применением комплекса электроразведочных методов, позволяющих извлекать информацию с глубин от нескольких километров до первых сотен метров. **Методы.** Магнитотеллурическое зондирование, зондирование становлением поля, электротомография с измерением вызванной поляризации. **Результаты и выводы.** По данным магнитотеллурических исследований в основании рудной зоны была выделена субвертикальная низкоомная неоднородность линзовидной формы, глубина кровли которой отмечается на 4 км. Кроме этого, на глубине от 2 до 3 км выявлен скрытый высокоомный Тельбесский магматический комплекс шириной от 10 км. Эти геоэлектрические структуры авторы используют в качестве глубинных критериев для картирования рудных зон района исследований. Метод зондирования становлением поля в условиях Турунтаевской рудной зоны может применяться для картирования положения кровли рудовмещающих палеозойских пород, но не позволяет решить основную геологическую задачу – поиск рудных объектов. По данным электротомографии с измерением вызванной поляризации прослеживаются линейные узкие зоны пониженного удельного электрического сопротивления, ассоциирующиеся с рудоконтролирующими структурами и подтвержденные бурением. Эти зоны или их контакты сопровождаются линейными аномалиями повышенной поляризуемости, которые мы связываем с сульфидной минерализацией, включающей среди прочих минералов и сфалерит. Всего выделено четыре протяженных рудоконтролирующих структуры субмеридионального простирания, и была опровергнута версия существования пологозалегающих рудных тел. На примере Турунтаевской рудной зоны показано, что электропроводящие неоднородности, выделенные методами магнитотеллурических зондирований в верхней коре и электротомографии на глубине, не превышающей первые сотни метров, на различных стадиях поисков, должны быть использованы в качестве признаков для обнаружения и локализации новых объектов на прилегающих территориях.

Ключевые слова: Турунтаевская рудная зона, магнитотеллурические зондирования, электротомография, зондирование становлением поля, рудная геофизика, комплексирование геофизических методов

Благодарности: Авторы благодарны коллективу лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН за помощь в проведении полевых измерений, последующей обработке и интерпретации результатов. Выражаем благодарность генеральному директору управляющей компании ООО «УК ТИСК» А.Ю. Беляеву за содействие в проведении полевых работ методом МТЗ. Исследования выполнены при частичной поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) № FWZZ-2022-0024.

Для цитирования: Комплексирование электроразведочных методов при поисках рудоконтролирующих структур в условиях Турунтаевской рудной зоны (Томская область) / А.А. Заплавнова, В.В. Оленченко, Е.В. Поспеева, П.С. Осипова, Б.Б. Логутов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 62–75. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4652

UDC 550.37

DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4652

Scientific paper

Combination of electrical exploration methods in searching for ore-controlling structures in the Turuntaevskaya ore zone (Tomsk region)

A.A. Zaplavnova^{1✉}, V.V. Olenchenko^{1,3}, E.V. Pospeeva¹, P.S. Osipova¹, B.B. Logutov²

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

² Limited Liability Company «Inert-Stroy», Tomsk, Russian Federation

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

✉ Zaplavnovaaa@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. The prospects of expanding the mineral resource base are currently associated with the search for "hidden type" deposits, which do not have access to the surface. Such objects are characterized by large thicknesses of overlying sediments reaching 100 and more meters. Prospecting geophysical works in such conditions is not always effective due to incorrectly selected set of methods and non-observance of research stages. One of the possible ways to search for such objects is to identify the deep ore-controlling structure in small-scale prospecting and subsequent detailing of the section upper part by large-scale studies. **Aim.** To obtain new information about the Turuntaevskaya ore zone structure using a set of electrical exploration methods. The set allows extracting information from depths of several kilometers to the first hundreds meters. **Methods.** Magnetotelluric sounding, transient electromagnetic sounding, electrical resistivity tomography with measurement of induced polarization. **Results and conclusions.** According to magnetotelluric studies data, a conducting heterogeneity of lenticular shape was identified at the base of the ore zone. The roof depth of which is noted at 4 km. The identification of a hidden intrusive body of the Telbes magmatic complex at a depth from 2 to 3 km and with a width of 10 km is also a significant result. The authors use these geoelectric structures as depth criteria for mapping ore zones in the study area. The transient electromagnetic sounding method in the conditions of Turuntaevskaya ore zone, can be used to map the position ore-bearing Paleozoic rocks top, but does not allow solving the main geological problem – the search for ore objects. According to the data of electrical resistivity tomography with measurement of induced polarization, linear narrow zones of low electric resistivity associated with ore-controlling structures and confirmed by drilling are traced. These zones or their contacts are accompanied by linear anomalies of increased polarizability, which we associate with sulphide mineralization. In total, four extended ore-controlling structures of submeridional strike were identified, and the version of the existence of hollow-lying ore bodies was refuted. On the example of Turuntaevskaya ore zone it was shown that conductive heterogeneities identified by methods of magnetotelluric sounding and electrotomography at various stages of prospecting should be used as prospecting criteria in the search for new objects in the adjacent areas.

Keywords: Turuntaevskaya ore zone, magnetotelluric sounding, transient electromagnetic sounding, electrical resistivity tomography with measurement of induced polarization, ore geophysics, complex of geophysical methods

Acknowledgements: The authors are grateful to the staff of the Geoelectrics Laboratory of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS for assistance in field measurements, subsequent processing and interpretation. We express our gratitude to A.Yu. Belyaev, General Director of the managing company UK TISK LLC, for support in field magnetotelluric survey. The research was partially supported by the Fundamental Scientific Research Program (FSRP) project no. FWZZ-2022-0024.

For citation: Zaplavnova A.A., Olenchenko V.V., Pospeeva E.V., Osipova P.S., Logutov B.B. Combination of electrical exploration methods in searching for ore-controlling structures in the Turuntaevskaya ore zone (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 62–75. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4652

Введение

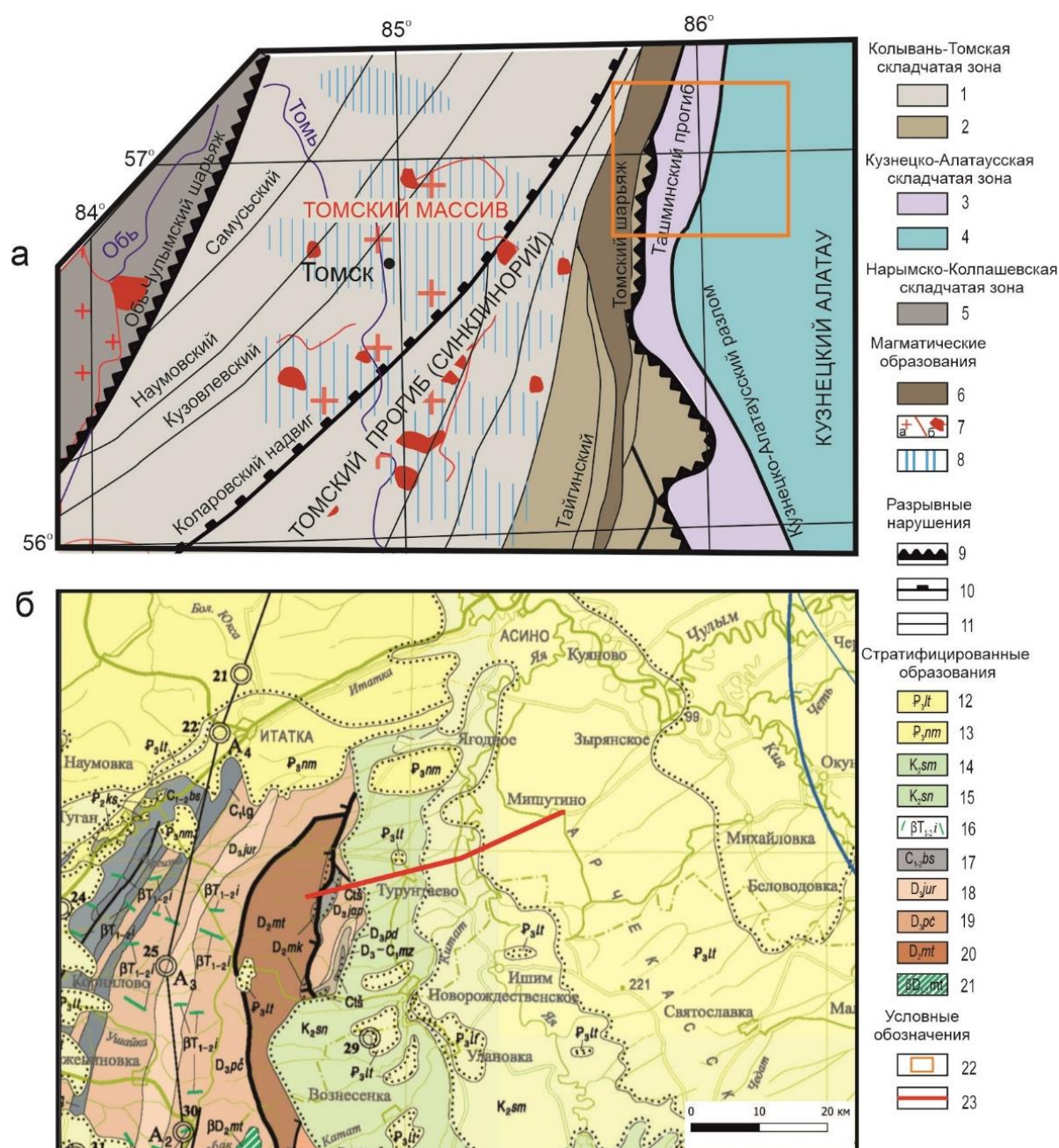
Иерархия металлогенических таксонов – провинций, районов, узлов, месторождений и отдельных рудных тел – проявляется в геоэлектрических аномалиях разного масштаба – от глубинных проводящих неоднородностей в литосфере до отдельных аномалий, связанных с рудными телами в верхней части разреза.

Эндогенные рудогенерирующие системы построены по единой схеме, включающей три уровня: зону генерации или глубинный источник мобильной фазы (магм или флюидов) с растворенными в ней рудными компонентами; зону консолидации, где мобильная фаза кристаллизуется (в случае магматических расплавов) или сбрасывает рудную нагрузку и рассеивается

(в случае флюидных потоков); транспортную зону или дренажную сеть, выводящую мобильную фазу в верхние горизонты земной коры. В процессе формирования эндогенных месторождений решающая роль принадлежит дорудным структурам, которые определяют пути движения рудоносных растворов. Они разделяются на рудоподводящие, рудораспределяющие и рудовмещающие. Комплексирование электроразведочных методов, обеспечивающих разную глубинность и разрешающую способность, позволяет изучить как рудоподводящие, так и рудовмещающие зоны [1, 2].

Перспективы расширения минерально-сырьевой базы в настоящее время связаны с поиском не

имеющих выходов на поверхность месторождений «скрытого типа» [3]. Для таких объектов характерны большие мощности перекрывающих отложений, достигающие 100 и более метров. Проведение поисковых геофизических работ в подобных условиях является не всегда результативным из-за неправильно подобранного комплекса методов и несоблюдения стадийности исследований. Одним из возможных способов поиска таких объектов является выявление глубинной рудоконтролирующей структуры при мелкомасштабных поисках с последующей детализацией верхней части разреза крупномасштабными исследованиями.



Примером скрытого рудопроявления является Турунтаевская рудная зона, расположенная в Томском районе Томской области на стыке структур Кузнецкого Алатау и Колывань-Томской складчатой зоны. Она характеризуется блоковым строением фундамента, осложненным надвиговыми структурами и крутопадающими геологическими объектами [4, 5]. Оруденение относится к вкрапленному и прожилково-вкрапленному типам колчеданно-полиметаллической формации. Рудные тела представлены в основном сфалеритом, в меньшей степени галенитом, пиритом, халькопиритом и арсенопиритом. На отдельных участках наблюдаются сгущения прожилково-вкрапленных руд до штокверков с характерными углами залегания 45–60° [6–8].

Впервые Турунтаевская рудная зона была выделена в 1964 г. при проведении геологосъемочных работ масштаба 1:50000. Зона прослежена на 12 км вдоль Яйского горста Кузнецкого Алатау при ширине 1–2 км и вскрыта скважинами на глубину до

500 м [8]. Геофизические исследования рудной зоны ограничились методами магниторазведки, вертикальных электрических зондирований с измерением вызванной поляризации (ВЭЗ-ВП), срединного градиента с измерением вызванной поляризации (СГ-ВП) и измерениями естественного электрического поля (ЕП) в 80-х гг. прошлого века, которые не дали существенных результатов [6]. Глубинные геофизические исследования ранее не проводились. Однако с появлением новой аппаратуры и программного обеспечения возможности электроразведочных методов при исследовании сложностроенных геологических структур значительно расширились.

Целью настоящих исследований являлось получение новой информации о строении Турунтаевской рудной зоны на базе комплексирования электроразведочных методов, позволяющих изучать геологический разрез с первых десятков метров до глубин свыше 10 км.

Рис. 1. а) геолого-структурная схема Колывань-Томской складчатой зоны масштаба 1:100000 с изменениями по [10]; б) фрагмент Государственной геологической карты доплиоценовых образований масштаба 1:1000000 [8]: 1 – Томская подзона. Терригенные прибрежно-морские и лагунно-континентальные фации Томского прогиба; 2 – Зарубинско-Лебедянская подзона. Вулканогенные, карбонатно-терригенные прибрежно-морские фации; 3 – Ташминская подзона. Карбонатно-терригенные, прибрежно-морские, терригенные лагунно-континентальные фации Ташминского прогиба; 4 – Усманская подзона. Карбонатно-терригенные прибрежно-морские, лагунно-континентальные красцветные фации Усманского прогиба; 5 – Нарымско-Колпашевская складчатая зона; 6 – вулканиты митрофановской свиты (D2 mt); 7 – нескрытые, предполагаемые по геофизическим данным: а) фронтальные части, б) выступы; 8 – ареолы распространения даек основного состава (T1–2); 9 – шарьяж; 10 – надвиг; 11 – разломы главные достоверные, выходящие на картографируемую поверхность; 12 – Лагернотомская свита. Пески, алевриты, глины с прослоями и линзами бурых углей; 13 – Новомихайловская свита. Пески, глины, алевриты, прослойки и линзы бурых углей; 14 – Сымская свита. Пески каолинизированные, глины и алевриты, прослойки бурого угля; 15 – Симоновская свита. Пески с прослоями песчаников и глин; 16 – Изылинский дайковый комплекс гипабиссальный. Дайки долеритов, монзонитов, монцодиоритов; 17 – Басандайская свита. Песчаники, алевриты с прослоями глинистых сланцев пропластками каменного угля; 18 – Юргинская свита. Песчаники с прослоями глинистых и известково-глинистых сланцев; 19 – Пачинская свита. Сланцы глинистые, филлиты, прослойки алеврито-глинистых сланцев; 20 – Митрофановская свита. Базальты и их туф, хлорит-серицитовые сланцы, плагиоридоциты, красноцветные песчаники и алевриты, линзы известняков; 21 – Субвулканические образования. Штоки и дайкообразные тела долеритов; 22 – Расположение фрагмента карты доплиоценовых образований; 23 – профиль магнитотеллурического зондирования (MT3)

Fig. 1. а) geological and structural scheme of the Kolyvan-Tomsk folded zone at a scale of 1:100000 with changes according to [10]; б) fragment of the State Geological Map of Pre-Pliocene formations at a scale of 1:1000000 [8]. 1 – Tomsk subzone. Terrigenous coastal-marine and lagoonal-continental facies of the Tomsk trough; 2 – Zarubinsko-Lebedyanskaya subzone. Volcanogenic, carbonate-terrigenous coastal-marine facies; 3 – Tashminskaya subzone. Carbonate-terrigenous, coastal-marine, terrigenous lagoonal-continental facies of the Tashma Trough; 4 – Usmanskaya subzone. Carbonate-terrigenous-terrigenous coastal-marine, lagoonal-continental red-colored facies of the Usman Trough; 5 – Narym-Kolpashev folded zone; 6 – volcanics of the Mitrofanov Formation (D2 mt); 7 – uncovered, inferred from geophysical data: а) frontal parts, б) ledges; 8 – dykes areoles of basic composition (T1–2); 9 – shuffling; 10 – thrusting; 11 – main reliable faults extending to the mapped surface; 12 – Lagernotomskaya Formation. Sands, siltstones, clays with interlayers and lenses of brown coal; 13 – Novomikhailovskaya Formation. Sands, clays, siltstones, interlayers and lenses of lignite; 14 – Sym Formation. Kaolinized sands, clays and siltstones, interlayers of brown coal; 15 – Simonov Formation. Sands with interlayers of sandstones and clays; 16 – Hypabyssal Izylynsky dyke complex. Dikes of dolerites, monzonites, monzoniorites; 17 – Basandai Formation. Sandstones, siltstones with interlayers of clay shales and interlayers of coal; 18 – Yurginskaya Formation. Sandstones with interlayers of clayey and calcareous shale; 19 – Pachinskaya Formation. Clay shales, phyllites, interlayers of silty-clay shales; 20 – Mitrofanovskaya Formation. Basalts and their tuffs, chlorite-sericite shales, plagioidocites, red-colored sandstones and siltstones, limestone lenses; 21 – Subvolcanic formations. Stokes and dyke-like bodies of dolerites; 22 – Location of a fragment of the map of pre-Pliocene formations; 23 – magnetotelluric sounding (MTS)

Характеристика объекта исследования

Турунтаевская рудная зона относится к Тамшинскому полиметаллическому рудному узлу, расположенному в зоне сочленения структур Кузнецкого Алатау и Колывань-Томской складчатой зоны (рис. 1). Колывань-Томская складчатая зона была сформирована в среднепалеозойское время и сложена в основном геодинамическими комплексами обширного задугового бассейна. Важную роль в формировании современной структуры Колывань-Томской складчатой зоны играли разломы надвиговой морфологии. Такой кинематике разломов соответствует и общая структура зоны, представленная двумя крупными дугообразными сегментами.

Особенностью описываемого района является то, что он относится к складчатому обрамлению Западно-Сибирской плиты, но при этом имеет признаки платформенной области. Так, складчатый фундамент, сложенный породами палеозоя и протерозоя, перекрывается платформенным чехлом рыхлых отложений мезозоя–кайнозоя. Причиной этому служит значительная пенепленизация этой территории к верхнемеловому времени с последующим общим с плитой эпейрогеническим опусканием [4]. Сложное и длительное геологическое развитие обусловило формирование разнообразных магматических породных ассоциаций, различающихся по возрастному положению, геодинамическим обстановкам, петрогеохимическим характеристикам и рудоносности [7–9].

Изучаемое рудное поле имеет линейную форму, обусловленную привязанностью к крутопадающим разрывным нарушениям субмеридионального (Кузнецко-Алатаусского) направления. Зона прослежена по простиранию на 12 км при ширине 1–2 км и вскрыта скважинами на глубину до 500 м. Оруденение расположено в контактовых областях кембрийских, девонских вулканогенно-осадочных образований, а также в приконтактных областях интрузивного тела гипербазитов. Ранее, на основании результатов наземной магнитометрии, ВЭЗ-ВП и геологических изысканий, в рудной зоне выделено три участка: Центральный, Искринский, Восточный [6–9].

На Центральном участке проявление представляет собой крутопадающий линейный штокверк. Продуктивная толща включает в себя гидротермально измененные вулканы основного-среднего состава, которые прорывают также измененные силлообразные дайковые тела микродиоритов. Интенсивный метасоматоз выражается в окварцевании, карбонатизации, серицитизации. Мощность околорудных метасоматитов составляет десятки метров. Минерализация в метасоматитах представлена рассеянной вкрапленностью сфалерита, пирита, халькопирита. Продуктивная зона имеет паде-

ние на восток-северо-восток под углами 45–60°. Мощность перекрывающих оруденение рыхлых отложений составляет 70–80 м.

На Искринском участке тремя скважинами, расположенными на одном профиле, вскрыто 7 рудных проявлений, объединяющихся в единую минерализованную зону, падающую на ВСВ под углом 45° [7–9]. Характер метасоматоза и оруденения на Искринском участке аналогичен Центральному. По простиранию рудные тела не прослежены. В скважине № 150 на этом участке сфалерит находится совместно с галени- том, что является редким случаем для зоны [5, 8].

Методика исследования

Комплекс геофизических методов включал магнитотеллурическое зондирование (МТЗ), электромагнитное зондирование становлением поля (ЗС) и электротомографию с измерением вызванной поляризации (ЭТ-ВП).

Исследования методом МТЗ были направлены на изучение глубинного строения Турунтаевской рудной зоны. Общая протяженность профиля составила около 40 км с шагом 5 км и детализацией до 1 км на территории лицензионной площади. Общее количество измерений составило 15 МТ-пунктов (рис. 2).

Полевые измерения выполнялись аппаратурой МТЗ «Nord plus» российского производства «ООО Северо-Запад» в диапазоне периодов 0,003–10000 с. Регистрировались четыре компонента (E_x , E_y , H_x , H_y) магнитотеллурического поля. Применялась крестообразная установка с длиной электрических диполей 100 м с ориентировкой линий на магнитный север. Средняя длительность записи составила 20 часов.

Обработка четырёхкомпонентных записей магнитотеллурического поля выполнена в программе ЕРИКП, реализующей современные алгоритмы спектрального анализа в режимах одиночных ("local", SS) и при необходимости синхронных зондирований с удаленной базой ("remote reference", RR). Главной особенностью при обработке полученных данных была операция приведения симметричного тензора к его главным осям. Известно [11], что при вращении тензора импеданса $|Z|$ в одном пункте зондирования можно получить множество амплитудных и фазовых кривых ρ_{xy} , ρ_{yx} и φ_{xy} , φ_{yx} . Конфигурация кривых существенно зависит от их ориентации, и они могут противоречить друг другу. Поэтому после первичной обработки полевых данных на каждом пункте зондирования был выполнен анализ амплитудных диаграмм тензора импеданса и определен угол α , характеризующий его главные направления. После чего вновь проводилась обработка данных с поворотом системы координат на этот угол. Количественная интерпретация кривых МТЗ выполнялась методом подбора с использованием программного комплекса WinGLink и электронных палеток.

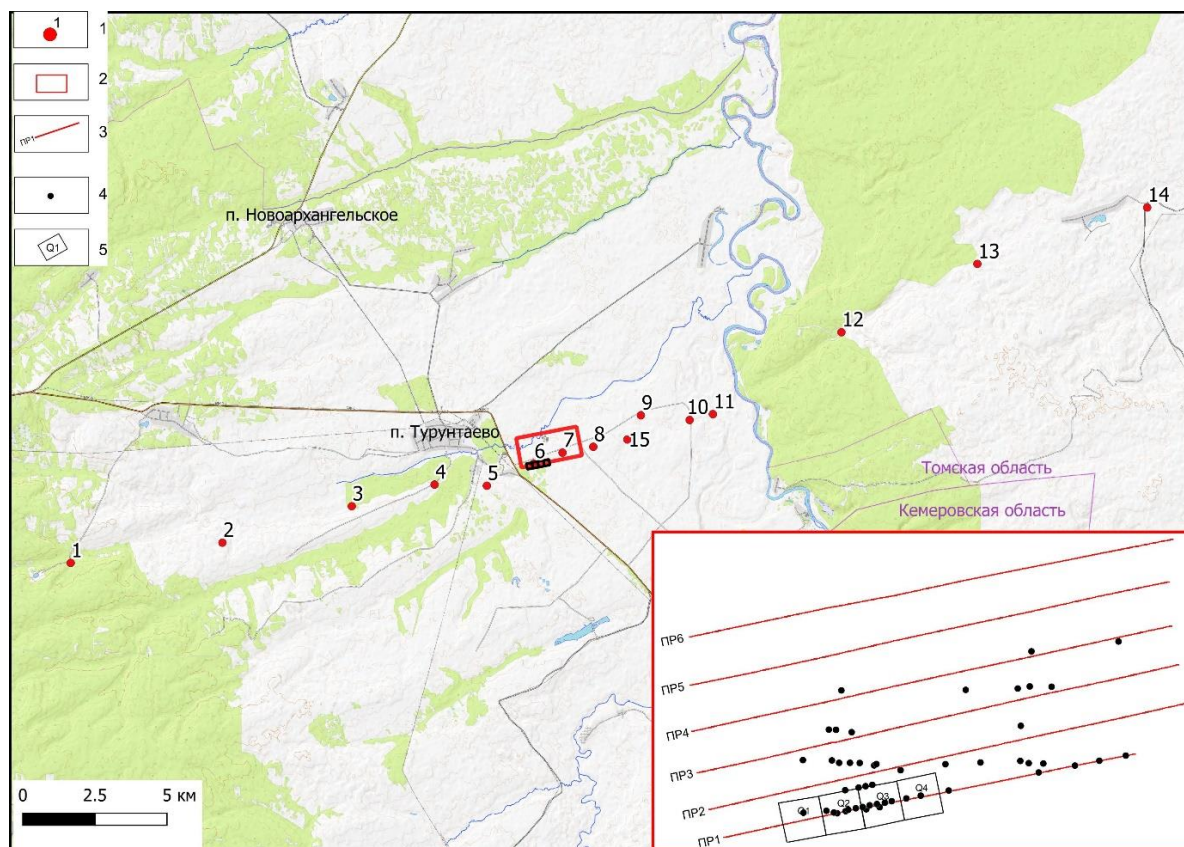


Рис. 2. Схема полевых исследований: 1 – пункты МТЗ и их номер; 2 – положение участка работ ЭТ-ВП; 3 – профили ЭТ-ВП и их номер; 4 – положение скважин; 5 – генераторные петли метода зондирования становления поля

Fig. 2. Scheme of field works: 1 – MTS and their number; 2 – location of ERT-IP work area; 3 – electrical resistivity tomography with measurement of induced polarization (ERT-IP) profiles and their numbers; 5 – transient electromagnetic sounding (TES) generator loops

Методом ЗС проводились площадные исследования от четырёх генераторных петель размером 200 на 200 м с 9 пикетами внутри каждой генераторной петли с равномерным шагом. Всего было проведено 36 измерений. Профиль ЗС располагался вдоль буровой линии (б.л.) № 5.5, совпадающей с профилем 1 ЭТ-ВП (рис. 2). Центр второй петли находится на расстоянии менее 50 м к югу от пункта МТЗ 6 (рис. 2). Измерения выполнялись аппаратурой «Fast Snap» (ООО «Сигма-Гео»). Предварительная обработка осуществлялась в программном комплексе «Tem-Processing», поставляемом с аппаратурой. Локальной задачей являлась оценка информативности метода ЗС при поисках рудных зон в пределах Турунтаевской рудной зоны.

Зондирования методом ЭТ-ВП проведены на участке Центральный по 6 профилям с целью определения простираения рудной зоны, вскрытой буровой скважиной на б.л. № 5.5. Участок работ располагался между МТ-пунктами 6–8 (рис. 2). Расстояние между профилями ЭТ-ВП составило 200 м. Зондирования выполнялись трехэлектродной прямой и встречной установками. Межелектродное расстояние равнялось 15 м. Измерения выполнены

с помощью современной многоканальной аппаратуры «Скала 48-к12» производства ООО «Конструкторское бюро электротметрии» (г. Новосибирск). Обработка измеренных данных производилась в специализированном программном комплексе Xeris, которое поставляется в комплекте с измерительной аппаратурой. Решение обратных задач (инверсия) в рамках двумерных и трёхмерных поляризуемых моделей выполнялась с помощью программ Res2Dinv32 версии 3.56.22 и Res3Dinvx64 версии 3.14.20.

Вызванная поляризация оценивалась по параметру заряжаемости (m) в диапазоне 20–100 мс, который представляет собой отношение интеграла напряжения, измеренному в интервале времени после выключения импульса тока к напряжению, измеренному в конце импульса напряжения после выключения импульса тока (1):

$$m = \frac{1}{U_{\text{ПР}}(t_1 - t_2)} \int_{t_2}^{t_1} U_{\text{ВП}}(t) dt, \quad (1)$$

где $U_{\text{ВП}}(t)$ – напряжение, измеренное в интервале времени (t_1, t_2) после выключения импульса тока; $U_{\text{ПР}}(t)$ – напряжение, измеренное в конце импульса тока [12].

Результаты

Магнитотеллурические зондирования

Профиль МТЗ длиной 40 км с юго-запада на северо-восток пересекает ряд крупных геологических структур: Омутинскую горст-антиклиналь, Ташминский грабен-синклиналь, Яйский горст, Усманскую синклиналь. На геоэлектрическом разрезе мезо-кайнозойский осадочный чехол, представленный песчано-глинистыми отложениями, выделяется слоем с низкими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) – 10–30 Ом·м. Толщина слоя возрастает с юго-запада на северо-восток с 50 до 100 м (рис. 3).

Под осадочными отложениями Омутинской антиклинали и Усманской синклинали залегают мощные комплексы девонских вулканических пород, представленных андезитами, хлорит-серицитовыми сланцами лавами, туфами, базальтами и туфопесчаниками с прослоями известняков со значениями УЭС 350–400 Ом·м.

Ташминская грабен-синклиналь располагается между Томским шарьяжем и Кузнецко-Алатаусским разломом. Томский шарьяж имеет сложное строение и при этом слабо проявляется в геоэлектрическом разрезе. Висячее крыло представлено эффузивными

породами девонского возраста, залегающими на додевонском кристаллическом фундаменте. Геоэлектрический разрез грабен-синклинали характеризуется трехслойным строением: верхний слой представлен проводящим чехлом (10–30 Ом·м); второй – известняками, песчаниками, алевролитами и мергелями предположительно девонско-каменноугольного возраста (200 Ом·м); третий относится к Тельбескому моноцит-гранитовому плутоническому комплексу. Третий горизонт представляет особый интерес. Его кровля картируется на глубинах 2–3 км, а значения УЭС достигают 850–950 Ом·м (рис. 3). По мнению авторов, этот слой относится к Тельбескому моноцит-гранитовому плутоническому комплексу (D₁). Согласно литературным данным, здесь предполагается существование скрытого интрузивного массива [5], в том числе Тельбесского комплекса [8, 13], как участника многостадийного процесса рудообразования. Тельбесский массив простирается более чем на 100 км параллельно борту Кузнецкого прогиба при средней ширине 10 км и имеет многочисленные апофизы. В.Л. Хомичев [13] отмечает его связь с глубинным разломом, многостадийность внедрения и разнообразный состав.

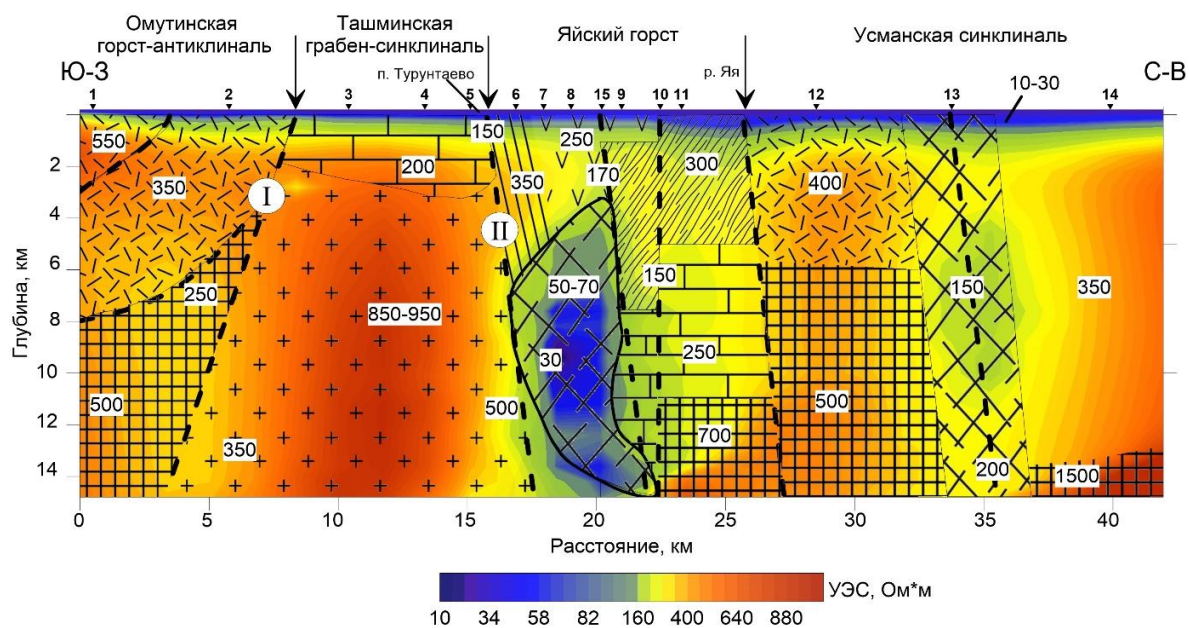


Рис. 3. Разрез УЭС по результатам МТЗ с элементами интерпретации: 1 – гранитоидный комплекс; 2 – додевонские (каледонские) структурные комплексы; 3 – известняки, песчаники, алевролиты; 4 – субвулканические образования: шток и дайкообразные тела; 5 – лавы, туфы, базальты, туфопесчаники; 6 – андезиты, базальты, туфы; 7 – зона флюидно-магматической переработки с повышенной трещиноватостью пород; 8 – хлорит-серицитовые сланцы; 9 – оси смещения основных разломов; I – Томский шарьяж; II – Кузнецко-Алатаусский разлом

Fig. 3. ER section based on MTS results with interpretation elements: 1 – granitoid complex; 2 – Devonian (Caledonian) structural complexes; 3 – limestones, sandstones, siltstones; 4 – subvolcanic formations: stock and dyke-like bodies; 5 – lavas, tuffs, basalts, tuff sandstones; 6 – andesites, basalts, tuffs; 7 – zone of fluid-magmatic processing, with increased fracturing of rocks; 8 – chlorite-sericite schists; 9 – axes of displacement of the main faults; I – Tomsk shuffle; II – Kuznetsk-Alatau fault

Более сложное геоэлектрическое строение у Яйского горста. Песчано-глинистый слой перекрывает палеозойский рудовмещающий комплекс, включающий систему разломов, толщи известняков с прослоями алевролитов и песчаников (200–250 Ом·м), Митрофановский комплекс субвулканических образований (D_2): штоков и дайкообразных тел (350 Ом·м) и вулканических пород ($\epsilon-D_2$) – андезиты, хлорит-серицитовые сланцы, базальты, туфы (300 Ом·м). Ниже по разрезу выделяется слой известняков с прослоями черных сланцев вендского возраста (250 Ом·м). Под ним фиксируются высокие значения УЭС (от 500 Ом·м), характерные для пород кристаллического протерозойского фундамента.

Области повышенной трещиноватости пород проявляются на разрезе в виде субвертикальных зон с пониженными значениями УЭС (до 150–170 Ом·м) (п.п. 5, 10, 13, 15). В районе пунктов 6–9 (рис. 3) выделяется проводящая неоднородность с глубиной залегания верхней кромки 4 км и сопротивлением, изменяющимся от 70–50 до 30 Ом·м. Аномалия имеет вытянутую линзовидную форму и погружается в северо-восточном направлении на глубину более 14 км. Аномалия может являться рудоподводящей структурой, по которой поступали рудоносные расплавы (или растворы) в верхние горизонты разреза земной коры.

Зондирование становлением поля

На геоэлектрическом разрезе, полученном по данным ЗС, контрастно выделяется граница мезо-

кайнозойских осадочных пород и высокоомного палеозойского основания (рис. 4). Первые характеризуются значениями УЭС 10–30 Ом·м, вторые – более 400 Ом·м. Тем не менее на разрезе практически не проявляется рудная зона, установленная бурением в интервале 625–800 м. Отмечается лишь незначительное понижение сопротивления до 440 Ом·м на фоне 530 Ом·м.

Эти результаты показали, что в геологических условиях Турунтаевской рудной зоны метод ЗС не является информативным при изучении рудных объектов, а может применяться только для структурных построений. Причиной низкой информативности метода предположительно являются сложные геологические условия района: крутопадающий характер залегания, слабая контрастность в УЭС и малая мощность рудовмещающих тел.

Электротомография

На разрезе УЭС по данным ЭТ-ВП (рис. 5) перекрывающая толща песчано-глинистых отложений выделяется слоем низкого УЭС до абсолютных отметок 0–50 м (глубина 70–120 м). При этом в низкоомном слое глин отчетливо выделяются слои аллювиальных песков повышенного УЭС. Ниже по разрезу залегает рудовмещающий высокоомный комплекс вулканических палеозойских пород. УЭС рудовмещающей толщи составляет 1000–3000 Ом·м, а в разломных зонах – 150–750 Ом·м.

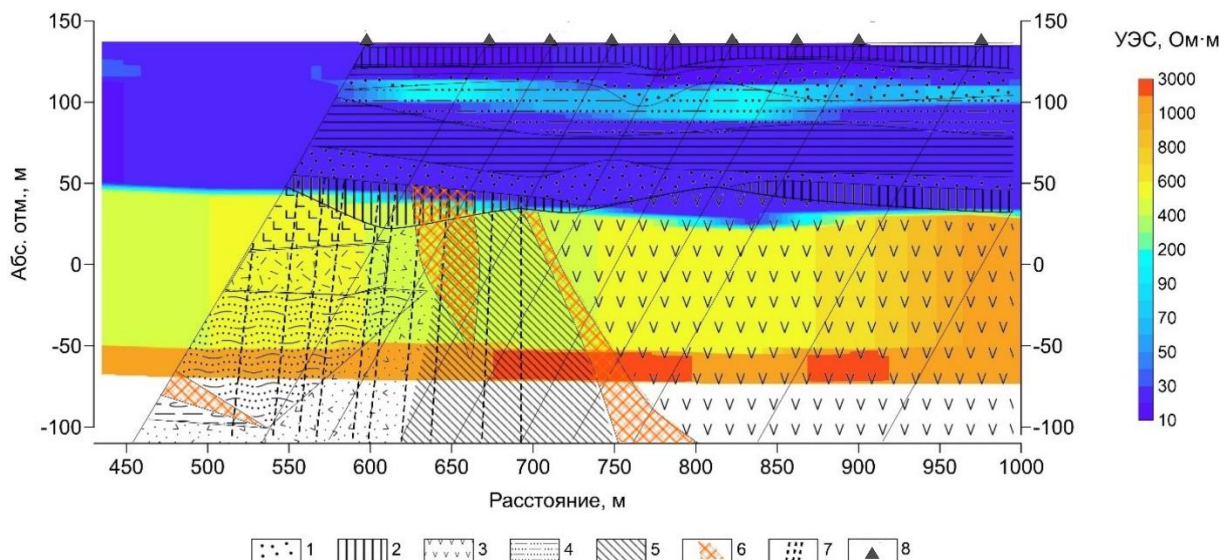


Рис. 4. Разрез УЭС по результатам зондирования становлением поля (ЗС) с элементами интерпретации: 1 – песок; 2 – глина; 3 – плагиоклазовые порфиристы; 4 – туфопесчаники и туфогравелиты; 5 – хлорит-серицитовые метасоматиты; 6 – кварц-карбонатные метасоматиты переходной зоны; 7 – разломы; 8 – положение скважины

Fig. 4. ER section based on the transient electromagnetic sounding (TES) results with interpretation elements: 1 – sand; 2 – clay; 3 – plagioclase porphyrites; 4 – tuffaceous sandstone and tuff gritstone; 5 – chlorite-sericite metasomatites; 6 – quartz-carbonate metasomatites of the transition zone; 7 – faults; 8 – drilling location

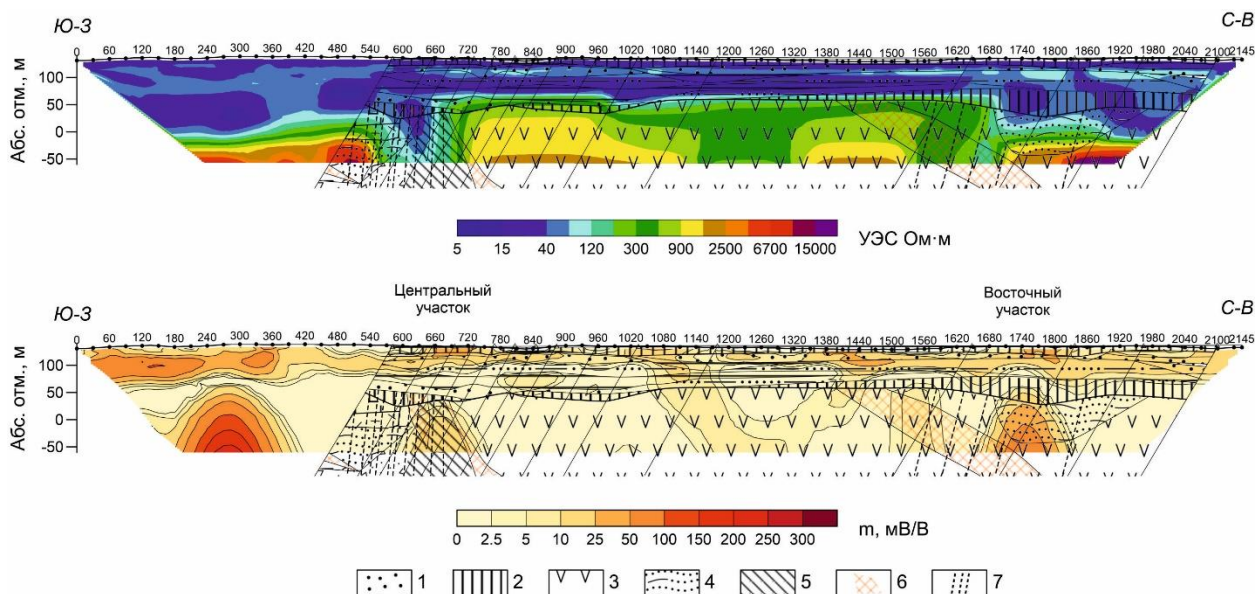


Рис. 5. Разрез УЭС профиля № 1 вдоль буровой линии (а), поляризуемости (б) с элементами интерпретации по результатам 2D-инверсии: 1 – песок; 2 – глина; 3 – плагиоклазовые порфириты; 4 – туфопесчаники и туфогравелиты; 5 – хлорит-серицитовые метасоматиты; 6 – кварц-карбонатные метасоматиты переходной зоны; 7 – разломы

Fig. 5. ER section of profile no. 1 along the drilling line (a), polarizability (b) with interpretation elements, based on the results of 2D inversion: 1 – sand; 2 – clay; 3 – plagioclase porphyrites; 4 – tuffaceous sandstone and tuff gritstone; 5 – chlorite-sericite metasomatites; 6 – quartz-carbonate metasomatites of the transition zone; 7 – faults

Сопоставление геоэлектрического разреза по результатам 2D-инверсии с геологическим разрезом вдоль буровой линии 5.5 (рис. 5, а) показало, что субвертикальные зоны пониженных значений УЭС, выделенные в палеозойском фундаменте, пространственно совпадают с рудоконтролирующими зонами дробления, установленными по данным бурения. Вскрытая скважинами зона дробления, контролирующая Центральный участок, однозначно выделяется в палеозойском цоколе аномалией пониженного УЭС в интервале профиля 540–720 м. На северо-восточном фланге разреза в палеозойском цоколе прослеживается аномалия пониженного УЭС, пространственно связанная с известным Восточным участком.

Между Центральным и Восточным участком на разрезе УЭС в интервале профиля 1200–1320 в рудовмещающей толще выделяется ещё одна зона пониженного сопротивления, перспективная на оруденение. Надо заметить, что поисковые скважины, пробуренные до геофизических исследований (к сожалению, это очень часто бывает на практике), не подсекли эту зону из-за разряженной буровой сети.

Поисковый интерес представляют аномалии вызванной поляризации (более 10 мВ/В) вертикальной формы в нижних частях разреза на уровне палеозойских пород (рис. 5). Поскольку в пределах Турунтаевской площади содержание сульфидов в рудных зонах крайне мало, интерес представляет

любое превышение значений m над нулевым фоном. Некоторые интенсивные аномалии ВП коррелируют с низкоомными аномалиями УЭС в эффузивах, которые ранее интерпретированы как разломные зоны. Аномалии высокой поляризуемости присутствуют и в восточной части профилей. Они тоже пространственно совпадают с зоной пониженных УЭС.

Анализ трёхмерной модели распределения УЭС показал (рис. 6), что в пределах площади исследований на уровне палеозойского фундамента развиты субмеридиональные узкие зоны пониженного сопротивления, интерпретируемые как рудоконтролирующие ослабленные зоны. Участки слабонарушенных вмещающих пород выделяются как области высокого УЭС.

В трёхмерной модели поляризуемости палеозойских пород выделяются линейные зоны повышенных значений m от 7 мВ/В и более на нулевом фоне (рис. 6, б). Несмотря на относительно малую интенсивность аномалий ВП (в пересчете на % получим от 0,7 до 5 %, в редких случаях до 20 %), эти зоны уверенно выделяются и совпадают с известными рудопроявлениями на Центральном и Восточном участках. Таким образом, на площади исследований, кроме известных рудных зон, по данным ЭТ-ВП выделены перспективные линейные аномалии поляризуемости на западном и восточном флангах участка и в центральной части на севере.

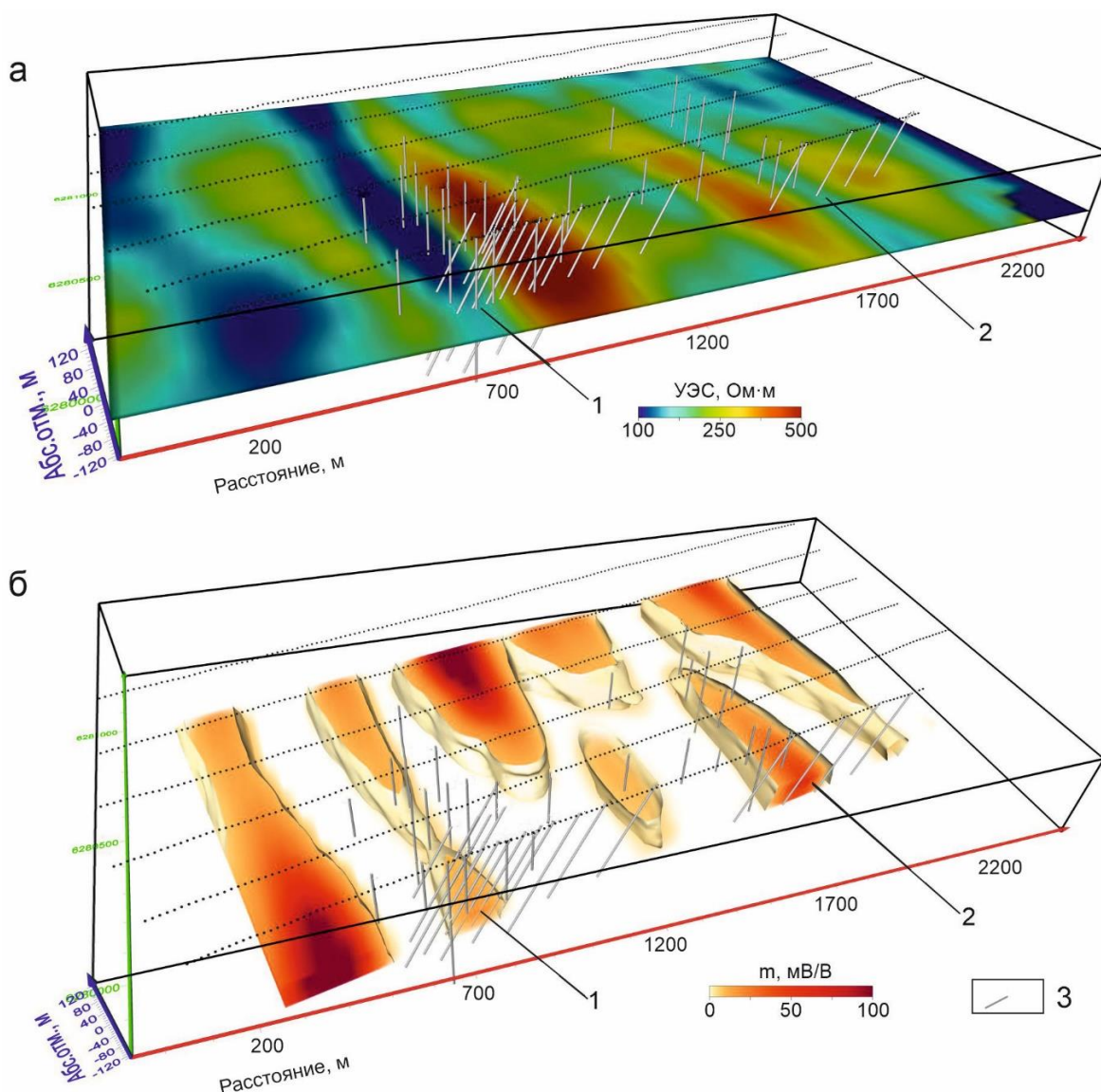


Рис. 6. Распределение УЭС (а) и поляризуемости (б) на уровне рудовмещающей толщи по результатам 3D-инверсии; цифрами отмечены участки: 1 – Центральный, 2 – Восточный; 3 – скважины

Fig. 6. ER distribution (a) and polarizability (b) at the level of ore-bearing strata based on the results of 3D inversion; the figures indicate the following areas: 1 – Central, 2 – Eastern; 3 –drilling locations

Обсуждение

Формирование месторождений полезных ископаемых происходит в результате концентрации полезных элементов или веществ под воздействием эндогенных, экзогенных или метаморфических процессов. Рудные узлы пространственно связаны с глубинными разломами на участках активного разуплотнения пород под влиянием тектонических деформаций, гидротермального метасоматоза и длительного воздействия нагретых мантийно-коровых флюидных потоков. Проявления таких процессов в геоэлектрических разрезах и связь месторождений с глубинными разломами отмечаются как российскими авторами, так и авторами по всему миру, например, [1, 2, 14–23] и многими другими.

Поисковым критерием для выделения рудоконтролирующих структур являются низкоомные суб-вертикальные или линзовидные аномалии низкого сопротивления в верхней части земной коры. Участки, где разрывные нарушения различной ориентировки пересечены вертикальными разломами, являются наиболее проницаемыми для гидротермальных растворов и обладают хорошей электрической проводимостью.

Локальная проводящая аномалия УЭС, выделенная по данным МТЗ в зоне сочленения крупных геологических структур вблизи высокоомного интрузивного тела (рис. 3), означает, что рассматриваемый участок представляет собой не только тектоническую зону, но и канал, осуществляющий связь

между различными глубинными уровнями, откуда поступали рудоносные растворы. Выделенная зона располагается над участком Центральной Турунтаевской рудной зоны, что подтверждает применимость поискового критерия для выделения рудоконтролирующих структур района по данным МТЗ.

Отдельно стоит отметить зону пониженных значений УЭС на МТ-пункте № 13 (рис. 3). Однако из-за того, что неоднородность выделена только на одном пункте измерений, нельзя с уверенностью утверждать, что эта аномалия является признаком рудоконтролирующей структуры. Понижение УЭС может быть связано с зоной повышенной трещиноватости пород непосредственно в МТ-пункте № 13, а может быть признаком расположенной в стороне сильно проводящей глубинной структуры. Для определения природы аномалии в верхней части земной коры необходимо проследить аномальную зону не менее чем на трех пунктах зондирования.

В пользу перспективности отмеченной зоны в МТ-пункте № 13 свидетельствует то, что оперяющие разломы Кузнецко-Алатаусской шовной зоны часто формируют структуры, выполняющие роль литологических или структурных ловушек, способствующих локализации месторождений [24, 25]. Вместе с этим по геологическим и геохимическим данным отмечается более широкое распространение золото-полиметаллической формации [7, 8, 26], закономерности размещения которой ещё предстоит изучить.

Результаты электротомографии показали, что рудоконтролирующие структуры уверенно выделяются на разрезах субвертикальными зонами пониженного сопротивления и повышенной поляризуемости, а в плане – узкими линейными аномалиями этих электрических параметров.

Следует отметить, что ранее, по результатам бурения, прогнозировались рудные тела, залегающие под углом около 45°. Однако анализ разреза поляризуемости (рис. 5, б) показал, что на Восточном участке на пикетах 1560 и 1740 скважины вскрыли два соседних крутопадающих рудных тела. А поскольку расстояние между скважинами составляло 180 м, корреляция рудных подсечений показала относительно пологое залегание предполагаемого рудного тела, хотя на самом деле это оказалось не так.

Площадные исследования методом ЭТ-ВП позволили не только проследить простираание известных рудных зон на Центральном и Восточном участках, но и выявить аномалии от ранее неизвестных потенциально рудоносных структур, которые будут заверены бурением.

Заключение

В результате исследований Турунтаевской рудной зоны с применением разноглубинных электро-разведочных методов установлено следующее.

По данным магнитотеллурических исследований в основании рудной зоны была выделена проводящая неоднородность с УЭС 50–70 Ом·м и локальным понижением до 30 Ом·м. Кровля структуры залегает на глубине около 4 км, а вертикальная мощность превышает 10 км. Аномалия имеет вытянутую линзовидную форму с общим погружением в северо-восточную часть разреза. Эта электрическая аномалия ассоциируется с зоной эндогенных каналов флюидно-магматической переработки пород и является геоэлектрическим индикатором рудоконтролирующей структуры.

Выявление по данным МТЗ скрытого интрузивного тела Тельбесского магматического комплекса на глубине от 2 до 3 км при ширине от 10 км является значимым результатом, так как интрузивный магматизм играет немаловажную роль в процессах формирования рудных месторождений и служит дополнительным фактором при локализации положения рудных зон.

В северо-восточной части профиля выделена менее контрастная проводящая неоднородность (150 Ом·м на фоне 350–450 Ом·м). В данной области рекомендуется детализация измерений со сгущением шага МТЗ до 1 км. Для прогнозирования новой рудной зоны необходимо выделить проводящую структуру не менее чем на трех пунктах зондирования.

Стоит отметить, что метод МТЗ не предназначен для выявления отдельных месторождений. Однако позволяет значительно уменьшить площадь поисков за счёт локализации рудоконтролирующих структур в границах рудных зон, узлов или полей. По результатам исследований методом МТЗ рекомендуется последующая детализация строения перспективных зон другими электроразведочными методами до глубины в первые сотни метров.

Метод ЗСБ в условиях Турунтаевской рудной зоны может применяться для картирования положения кровли рудовмещающих палеозойских пород, но не позволяет решить основную геологическую задачу – поиск рудных объектов.

Для детализации перспективных зон, выделенных по данным МТЗ, рекомендуется использовать метод электротомографии с измерением вызванной поляризации. По данным ЭТ-ВП прослеживаются линейные узкие зоны пониженного УЭС, ассоциирующиеся с рудоконтролирующими структурами и подтверждённые бурением. Эти зоны или их контакты сопровождаются линейными аномалиями повышенной поляризуемости, которые мы связываем с сульфидной минерализацией (пиритом, халькопиритом, галенитом). Всего выделено четыре протяженных рудоконтролирующих структуры субмеридионального простираания.

Метод ЭТ-ВП дал возможность уточнить положение рудоконтролирующих структур в пределах участ-

ков Центральный и Восточный и опровергнуть версию существования пологозалегающих 45° рудных тел.

На примере Турунтаевской рудной зоны показано, что проводящие неоднородности, выделенные методами МТЗ и ЭТ-ВП на различных стадиях поисков должны быть использованы в качестве поисковых критериев при поисках новых объектов на прилегающих территориях. Такой подход позволяет оптимизировать объёмы поискового бурения.

Комплексирование разноглубинных методов геоэлектрики показало хорошие перспективы тако-

го подхода для поисков рудных месторождений в условиях Колывань-Томской складчатой зоны, где рудовмещающая толща перекрыта мощным чехлом рыхлых отложений.

Полученные результаты подчеркивают необходимость изучения глубинного геоэлектрического строения рудных районов. Понимание строения и процессов формирования рудных зон, узлов или полей позволит выделить новые закономерности размещения полезных ископаемых, повысит эффективность их поисков и разведки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Куликов В.А., Каминский А.Е., Яковлев А.Г. Совместная инверсия данных электротомографии и магнитотеллурических зондирований при решении рудных задач // Геофизические исследования. – 2017. – Т. 18. – № 3. – С. 27–44. DOI: 10.21455/gr2017.3-3
- Fu J., Jia S., Wang E. Combined magnetic, transient electromagnetic, and magnetotelluric methods to detect a BIF-type concealed iron ore body: a case study in gongchangling iron ore concentration area, southern liaoning province, China // Minerals. – 2020. – Vol. 10. – № 12. – P. 1044. DOI: 10.3390/min10121044
- Распоряжение Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р О стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 г. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201812280093> (дата обращения 10.04.2024).
- Геологическое строение области сопряжения Кузнецкого Алатау и Колывань-Томской складчатой зоны / В.А. Врублевский, М.П. Нагорский, А.Ф. Рубцов, Ю.Ю. Эрвье. – Томск: Изд-во Томского университета, 1987. – 96 с.
- Новый тип полиметаллической минерализации в Томской области / Б.М. Тюлюпо, А.Ф. Рубцов, Е.Я. Горюхин, В.А. Врублевский // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири. – Томск: ТГУ, 1979. – № 14. – С. 37–41.
- Глазырин А.Я., Филатов В.В. Отчет геофизической партии по поискам полиметаллических руд в пределах Турунтаевской зоны полиметаллической минерализации. – Томск: Томская ГРЭ, ПГО «Томскнефтегазгеология», 1983. – 35 с.
- Сорокин Е.И. Геолого-структурная позиция, вещественный состав руд Турунтаевского рудного узла (Томская область) и проект оценочных работ. – Томск ТПУ, 2019. – 159 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист О-45-Томск. Объяснительная записка / Я.Э. Файбусович, Л.И. Зылева, В.Е. Козырев, В.Н. Воронов, А.С. Воронин, Л.И. Рубин, О.С. Калашникова, К.В. Коркунов, Д.П. Куликов, Л.Е. Пестова, В.З. Фукс, А.Н. Макарова, Е.В. Монтонен, Л.П. Новикова. – СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2021. – 200 с.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Колывань-Томской складчатой зоны / В.И. Сотников, Г.С. Федосеев, Л.В. Кунгурцев, А.С. Борисенко, А.А. Оболенский, И.П. Васильев, В.О. Гимон. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. – 227 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации М 1:200000. 2-е изд. Серия Кузбасская Лист О-45-XXXII (Тайга). Объяснительная записка / Н.Ю. Ахмадшин, О.А. Дубинский, О.П. Капишников, А.С. Скогорева, А.Ф. Рубцов, Ю.В. Уткин, Т.И. Черникова, Е.И. Черняева, Е.В. Черняев, А.Ф. Шамахов, В.А. Домаренко, Е.П. Янкович. – СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. – 207 с.
- Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and methods of magnetotellurics. – Berlin: Springer Science & Business Media, 2008. – 564 с. DOI: 10.1007/978-3-540-77814-1
- Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. – 2022. – 237 p. URL: www.geotomosoft.com (дата обращения 10.04.2024).
- Глубинная модель габбро-монцодиорит-сиеногранитовой формации / В.Л. Хомичев, С.С. Долгушин, О.Г. Садур, В.В. Марков. – Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2004. – 109 с.
- Петрова А.А., Копытенко Ю.А. Флюидные системы Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны северного Забайкалья // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2019. – № 1. – С. 37–53. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-2-42-25-41
- Поспеева Е.В. Природа глубинной электропроводности и связь коровых аномалий с месторождениями полезных ископаемых // VIII Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021). – М., 4–9 октября 2021. – С. 1–6.
- Investigating the whole-lithosphere structure of a mineral system – pathways and source of ore-forming fluids imaged with magnetotelluric modeling // M.J. Comeau, M. Becken, A.V. Kuvshinov, S. Demberel, E. Batmagnai, S. Tserendug // DEEP International Symposium on Deep Earth Exploration and Practices Extended abstract. – Nanjing, China, October 26–31, 2021. – 3 с.
- Ore-controlling structures of the Xiangshan volcanic basin, SE China: revealed from three-dimensional inversion of Magnetotelluric data / J. Deng, H. Yu, H. Chen, Z. Du, H. Yang, H. Li, F. Guo // Ore Geology Reviews. – 2020. – Vol. 127. – P. 103807. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103807
- Application of multiscale magnetotelluric data to mineral exploration: an example from the east Tennant region, Northern Australia / W. Jiang, J. Duan, M. Doublier, A. Clark, A. Schofield, R.C. Brodie, J. Goodwin // Geophysical Journal International. – 2022. – Vol. 229. – № 3. – P. 1628–1645. DOI: 10.1093/gji/ggac029
- Kurtz R.D., Ostrowski J.A., Niblett E.R. A magnetotelluric survey over the East Bull Lake gabbro-anorthosite complex // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1986. – Vol. 91. – № B7. – P. 7403–7416. DOI: 10.1029/JB091iB07p07403
- Application of audio-magnetotelluric method for exploration the concealed ore-bodies in Yuele lead-zinc ore field, Daguan County, NE Yunnan Province, China / T.T. Lap, C. Xue, A. Wei, L. Liu, W. Li, Q. Hu, T. Zhang et al. // Journal of Geoscience and Environment Protection. – 2014. – Vol. 2. – № 03. – P. 35. DOI: 10.4236/gep.2014.23005

21. Crustal structures of the Qimantagh Metallogenic Belt in the northern Tibetan Plateau from magnetotelluric data and their correlation to the distribution of mineral deposits / L. He, Q. Di, Z. Wang, J. Lai, G. Xue, W. Guo // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – № 2. – P. 225. DOI: 10.3390/min13020225
22. The electrical conductivity of the Andean crust in northern Chile and southern Bolivia as inferred from magnetotelluric measurements / G. Schwarz, V. Haak, E. Martinez, J. Bannister // *Journal of Geophysics*. – 1984. – Vol. 55. – № 1. – С. 169–178.
23. Three-dimensional electrical resistivity of the north-central USA from Earth Scope long period magnetotelluric data / B. Yang, G.D. Egbert, A. Kelbert, N.M. Meqbel // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2015. – Vol. 422. – P. 87–93. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.04.006
24. Алабин Л.В. Структурно-формационная и металлогеническая зональность Кузнецкого Алатау. – Новосибирск: Изд-во «Наука» Сибирское отделение, 1983. – 113 с.
25. Черных А.И. Геолого-минералогическое картирование на золото масштаба 1:500000 Северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области (задачи, методика, результаты) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 16–22.
26. Иванова Г.М., Ильенок С.С. Эндеогенная золоторудная минерализация юга Томской области // *Известия Томского политехнического университета*. – 1970. – Т. 239. – С. 318–321.

Информация об авторах

Анна Алексеевна Заплавнова, младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; ZaplavnovaAA@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0775-3908>

Владимир Владимирович Оленченко, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Новосибирского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1; ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4386-7064>

Елена Валентиновна Поспеева, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; PospееvaEV@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5714-5652>

Полина Сергеевна Осипова, младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; Osipovaps@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0510-6333>

Борис Борисович Логут, главный геолог ООО «Инерт-Строй», Россия, 634061, г. Томск, пер. Нечевский, 20А. perm193xr@gmail.com

Поступила в редакцию: 15.04.2024

Поступила после рецензирования: 19.06.2024

Принята к публикации: 02.04.2025

REFERENCES

1. Kulikov V.A., Kaminsky A.E., Yakovlev A.G. Joint inversion of electrotomography and magnetotelluric sounding data in solving ore problems. *Geophysical Research*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 27–44. DOI: 10.21455/gr2017.3-3. (In Russ.)
2. Fu J., Jia S., Wang E. Combined magnetic, transient electromagnetic, and magnetotelluric methods to detect a BIF-type concealed iron ore body: a case study in gongchangling iron ore concentration area, southern liaoning province, China. *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 12, pp. 1044. DOI: 10.3390/min10121044
3. Order of the Government of the Russian Federation of December 22, 2018, No. 2914-r on the strategy for the development of the mineral resource base of the Russian Federation until 2035. (In Russ.) Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201812280093> (accessed 10 April 2024).
4. Vrublevsky V.A., Nagorskii M.P., Rubtsov A.F., Ervier Yu. *Geological structure of the Kuznetsk Alatau and Kolyvan-Tom folded zone conjugation area*. Tomsk, Tomsk University Press, 1987. 96 p. (In Russ.)
5. Tyulupo B.M., Rubtsov A.F., Goryukhin E.Ya. A new type of polymetallic mineralization in the Tomsk region. *New data on geology and minerals of Western Siberia*. Tomsk, TSU Publ., 1979. No. 14, pp. 37–41. (In Russ.)
6. Glazyrin A.Ya., Filatov V.V. *Report of geophysical party on search of polymetallic ores within Turuntaevskaya zone of polymetallic mineralization*. Tomsk, Tomskaya GRE, PGO «Tomskneftegazogeologiya» Publ., 1983. 35 p. (In Russ.)
7. Sorokin E.I. *Geological and structural position, material composition of ores of Turuntaevskoye ore nodule (Tomsk region) and project of evaluation works*. Tomsk, TSU Publ., 2019. 159 p. (In Russ.)
8. Faibusovich Y.E., Zyleva L.I., Kozyrev V.E., Voronov V.N., Voronin A.S., Rubin L.I., Kalashnikova O.S., Korkunov K.V., Kulikov D.P., Pestova L.E., Fuchs V.Z., Makarova A.N., Montonen E.V., Novikova L.P. *State geologic map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). West Siberian Series. Sheet O-45-Tomsk. Explanatory note*. St Petersburg, Cartographic Factory VSEGEI Publ., 2021. 200 p. (In Russ.)
9. Sotnikov V.I., Fedoseev G.S., Kungurtsev L.V., Borisenko A.S., Obolensky A.A., Vasiliev I.P., Gimon V.O. *Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Kolyvan-Tom folded zone*. Novosibirsk, SB RAS, SIC UIGGM Publ., 1999. 227 p. (In Russ.)
10. Akhmadshchin N.Yu., Dubinskaite O.A., Kapishnikova O.P., Skogoreva A.S., Rubtsov A.F., Utkin Y.V., Chernikova T.I., Chernyaeva E.I., Chernyaev E.V., Shamakhov A.F., Domarenko V.A., Yankovich E.P. *State geological map of the Russian*

- Federation M 1: 200000. 2nd ed. Series Kuzbass Sheet 0-45-XXXII (Taiga). Explanatory note.* St Petersburg, Cartographic Factory VSEGEI Publ., 2008. 207 p. (In Russ.)
11. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. *Models and methods of magnetotellurics.* Berlin, Springer Science & Business Media, 2008. – 564 c. DOI: 10.1007/978-3-540-77814-1
 12. Loke M.H. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.* 2022. 237 p. Available at: www.geotomosoft.com (accessed 10 April 2024).
 13. Khomichev V.L., Dolgushin S.S., Sadur O.G., Markov V.V. *Depth model of the gabbro-montsodiorite-syenogranite formation.* Novosibirsk, SSIIGaMR Publ., 2004. 109 p. (In Russ.)
 14. Petrova A.A., Kopytenko Yu.A. Fluid systems of the Mamsko-Bodaibinskaya mineralogenic zone of the northern Transbaikalia. *Vestnik KRAUNTS. Series: Earth Sciences*, 2019, no. 1, pp. 37–53. (In Russ.) DOI: 10.31431/1816-5524-2019-2-42-25-41.
 15. Pospeeva E.V. Nature of deep electrical conductivity and connection of crustal anomalies with mineral deposits. *VIII All-Russian school-seminar on electromagnetic soundings of the Earth named after M.N. Berdichevsky and L.L. Vanyan (EMZ-2021).* Moscow, October 4–9, 2021. pp. 1–6. (In Russ.)
 16. Comeau M.J., Becken M., Kuvshinov A.V., Demberel S., Batmagnai E., Tserendug S. Investigating the whole-lithosphere structure of a mineral system – pathways and source of ore-forming fluids imaged with magnetotelluric modeling. *DEEP International Symposium on Deep Earth Exploration and Practices. Extended abstract.* Nanjing, China, 2021. 3 p.
 17. Deng J.H., Chen H., Du Z., Yang H., Li H., Guo F. Ore-controlling structures of the Xiangshan volcanic Basin, SE China: revealed from three-dimensional inversion of Magnetotelluric data. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 127, 103807 p. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103807
 18. Jiang W., Duan J., Doublier M., Clark A., Schofield A., Brodie R.C., Goodwin J. Application of multiscale magnetotelluric data to mineral exploration: an example from the east Tennant region, Northern Australia. *Geophysical Journal International*, 2022, vol. 229, no. 3, pp. 1628–1645. DOI: 10.1093/gji/ggac029
 19. Kurtz R.D., Ostrowski J.A., Niblett E.R. A magnetotelluric survey over the East Bull Lake gabbro-anorthosite complex. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, vol. 91, no. B7, pp. 7403–7416. DOI: 10.1029/JB091iB07p07403
 20. Lap T.T., Xue C., Wei A., Liu L., Li W., Hu Q., Zhang T. Application of audio-magnetotelluric method for exploration the concealed ore-bodies in Yuele lead-zinc ore field, Dagan County, NE Yunnan Province, China. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2014, vol. 2, no. 03, 35 p. DOI: 10.4236/gep.2014.23005
 21. He L., Di Q., Wang Z., Lai J., Xue G., Guo W. Crustal structures of the Qimantagh Metallogenic Belt in the northern Tibetan Plateau from magnetotelluric data and their correlation to the distribution of mineral deposits. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 2, 225 p. DOI: 10.3390/min13020225
 22. Schwarz G., Haak V., Martinez E., Bannister J. The electrical conductivity of the Andean crust in northern Chile and southern Bolivia as inferred from magnetotelluric measurements. *Journal of Geophysics*, 1984, vol. 55, no. 1, pp. 169–178.
 23. Yang B., Egbert G.D., Kelbert A., Meqbel N.M. Three-dimensional electrical resistivity of the north-central USA from Earth Scope long period magnetotelluric data. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, vol. 422, pp. 87–93. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.04.006
 24. Alabin L.V. *Structural-formational and metallogenic zonality of the Kuznetsk Alatau.* Novosibirsk, Nauka Siberian Branch Publ., 1983. 113 p. (In Russ.)
 25. Chernykh A.I. Geological-mineralogenic mapping for gold on a scale of 1:500000 of the North-Western part of the Altai-Sayan folded region (tasks, methodology, results). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 1, pp. 16–22. (In Russ.)
 26. Ivanova G.M., Ilyenok S.S. Endogenous gold mineralization of the south of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 1970, vol. 239, pp. 318–321. (In Russ.)

Information about the authors

Anna A. Zaplavnova, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; ZaplavnovaAA@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0775-3908>

Vladimir V. Olenchenko, Cand. Sc., Associate Professor, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Leading Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4386-7064>

Elena V. Pospeeva, Dr. Sc., Leading Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; PospeevaEV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5714-5652>

Polina S. Osipova, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Osipovaps@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0510-6333>

Boris B. Logutov, Chief Geologist, Limited Liability Company «Inert-Stroy», 20A, Nechevsky lane, Tomsk, 634061, Russian Federation. perm193xp@gmail.com

Received: 15.04.2024

Revised: 19.06.2024

Accepted: 02.04.2025