

УДК 550.37

DOI: 10.46698/VNC.2024.45.42.008

Оригинальная статья

Выявление перекрытых разрывных нарушений методом электротомографии на примере городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан)

М.Ю. Маркин 

ТОО «ГеоСтройСистема», Республика Казахстан, 050000, г. Алматы,
Алатауский район, микрорайон Саялы, дом 41/1,
e-mail: markin_maxim@inbox.ru

Статья поступила: 15.03.2024, доработана: 12.04.2024, принята к публикации: 15.04.2024

Резюме: Актуальность темы определяется необходимостью выявления разрывных нарушений, скрытых под толщами осадочных пород, и оценки их строения, что является важнейшей задачей при районировании территорий по сейсмической опасности и одной из основ прогноза землетрясений и сейсмического микрорайонирования. Наблюдаемая в последние годы все более возрастающая активность литосферы связана, в том числе с активизацией тектонических разломов. Выявление подобных разломов, скрытых под мощными толщами осадочных пород, и оценка их текущей активности является актуальной задачей при районировании территорий по сейсмической опасности и основой прогноза землетрясений. Для этого, как показал анализ опубликованной литературы, все чаще применяется метод электротомографии. **Цель работы:** на основе определения кажущегося электрического сопротивления оценить степень дезинтеграции горных пород в зонах разрывных нарушений, проявленных в границах города Усть-Каменогорск, в пределах геодинамически активной Иртышской зоны смятия. **Методы исследования:** Проведены полевые исследования разломных зон методом электротомографии. Выполнен дипольный, шлюмберже и прямой (обратный) трехэлектродный тип установки методом сопротивлений. Наблюденное электрическое поле, нормировано по параметрам установки до такой степени, чтобы кажущееся электрическое сопротивление совпадало с истинным удельным электрическим сопротивлением, называемым кажущимся удельным электрическим сопротивлением. Данный метод позволяет получить характеристики сложно построенной среды и проводить интерпретацию в рамках двумерных моделей. **Результаты исследования:** показано, что использованный метод электротомографии позволяет получить достаточно полное представление о строении разрывного нарушения в условиях отсутствия его выхода на поверхность; установлено, что величина кажущегося электрического сопротивления определяется главным образом типом и степенью тектонической и современной экзогенной разрушенности пород, выполняющих сместитель разлома, и это связано с периодической активизацией изученных разломов и малоамплитудными подвижками по сместителю. Определены основные характеристики простирания разломов, наклона их сместителей, характер горных пород, заполняющих зоны сместителя.

Ключевые слова: Иртышская зона смятия, город Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, разломы, электротомография, кажущееся электрическое сопротивление (ρ_k).

Благодарности: Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской программы: «Оценка сейсмической опасности территорий, областей и городов Казахстана на современной научно-методической основе».

Для цитирования: Маркин М.Ю. Выявление перекрытых разрывных нарушений методом электротомографии на примере городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 107-116. DOI: 10.46698/VNC.2024.45.42.008

DOI: 10.46698/VNC.2024.45.42.008

Original paper

Identification of overlapped ruptures by electrotomography on the example of urban agglomeration Ust-Kamenogorsk (Republic of Kazakhstan)

M.Y. Markin 

Geostroyssystem LLP, 41/1 bld., Sayaly microdistrict, Alatau district,
Almaty 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: markin_maxim@inbox.ru

Received: 15.03.2024, revised: 12.04.2024, accepted: 15.04.2024

Abstract: The relevance of the topic is determined by the need to identify discontinuous faults hidden under sedimentary rock strata and assess their structure. This is the most important task in zoning territories for seismic hazard and one of the foundations of earthquake prediction and seismic microzoning. The increasing activity of the lithosphere observed in recent years is associated, among other things, with the activation of tectonic faults. The identification of such faults hidden under powerful sedimentary rock strata and the assessment of their current activity is an urgent task when zoning territories for seismic hazard and the basis for earthquake prediction. For this purpose, as the analysis of the published literature has shown, the method of electrotomography is increasingly used. **The purpose of the work:** based on the determination of the apparent electrical resistance, to assess the degree of disintegration of rocks in the zones of discontinuous disturbances manifested within the boundaries of the city of Ust-Kamenogorsk, within the geodynamically active Irtysh crushing zone. **Research methods:** Field studies of fault zones by electrotomography were carried out. The dipole, Schlumberger and direct (reverse) three-electrode type of installation by the resistance method was performed. The observed electric field, normalized according to the installation parameters to such an extent that the apparent electrical resistance coincides with the true electrical resistivity, called the apparent electrical resistivity. This method allows us to obtain the characteristics of a complexly constructed environment and interpret it within the framework of two-dimensional models. **The results of the study:** it is shown that the electrotomography method allows to obtain a fairly complete picture of the structure of the rupture in the absence of its exit to the surface; it is established that the magnitude of the apparent electrical resistance is determined mainly by the type and degree of tectonic and modern exogenous destruction of rocks performing a fault displacement, and this is due to the periodic activation of the studied faults and low-amplitude progress on the displacement. The main characteristics of the fault strike, the slope of their displacements, and the nature of the rocks filling the displacement zones are determined.

Keywords: Irtysh crushing zone, Ust-Kamenogorsk city, Republic of Kazakhstan, faults, electrotomography, apparent electrical resistivity (ρ_k).

Acknowledgements: *The article was prepared within the framework of the research program: "Assessment of seismic hazard in the territories of regions and cities of Kazakhstan on a modern scientific and methodological basis".*

For citation: Markin M.Yu. Identification of overlapped ruptures by electrotomography on the example of urban agglomeration Ust-Kamenogorsk (Republic of Kazakhstan). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 107-116. DOI: 10.46698/VNC.2024.45.42.008

Введение

Проявившиеся в последнее время серии разрушительных землетрясений в Турции и Сирии демонстрируют все более возрастающую активность литосферы, связанную, в том числе с активизацией тектонических разломов. Выявление подобных разломов, скрытых под мощными толщами осадочных пород, и оценка их текущей

активности является актуальной задачей при районировании территорий по сейсмической опасности и основой прогноза землетрясений [Conti et al., 2021]. Одним из таких потенциально опасных районов проявления землетрясений тектонической природы является город Усть-Каменогорск (Республика Казахстан), расположенный в пределах Иртышской зоны смятия (ИЗС) [Маркин, 2023].

Целью данной работы является изучение строения разрывных нарушений методом электротомографии с использованием геологических данных на трех эталонных участках, соответствующих трем основным структурным подзонам Иртышской зоны смятия (рис. 1).

Материал и методы

Объектом исследования являются разрывные нарушения на территории г. Усть-Каменогорск (Республика Казахстан). В современных и в перспективных границах городская агломерация располагается полностью в пределах Иртышской зоны смятия (ИЗС) – одной из крупнейших тектонических структур западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса [Ермолов, Полянский, 2008; Буслев, 2011; Семинский, Зарипов, 2016 и др.]. Иртышская зона смятия представляет собой классический пример региональной сдвиговой зоны и представляет собой глубинный разлом шириной от 1,5 до 20 км, протягивающийся по территории России, Восточного Казахстана (г. Рубцовск, г. Усть-Каменогорск) в Китай (г. Фуюн) и далее в Монголию более чем на 1000 км. По особенностям внутреннего строения ИЗС подразделяется на 3 подзоны: Северо-Восточную, Осевую и Юго-Западную (рис. 1).

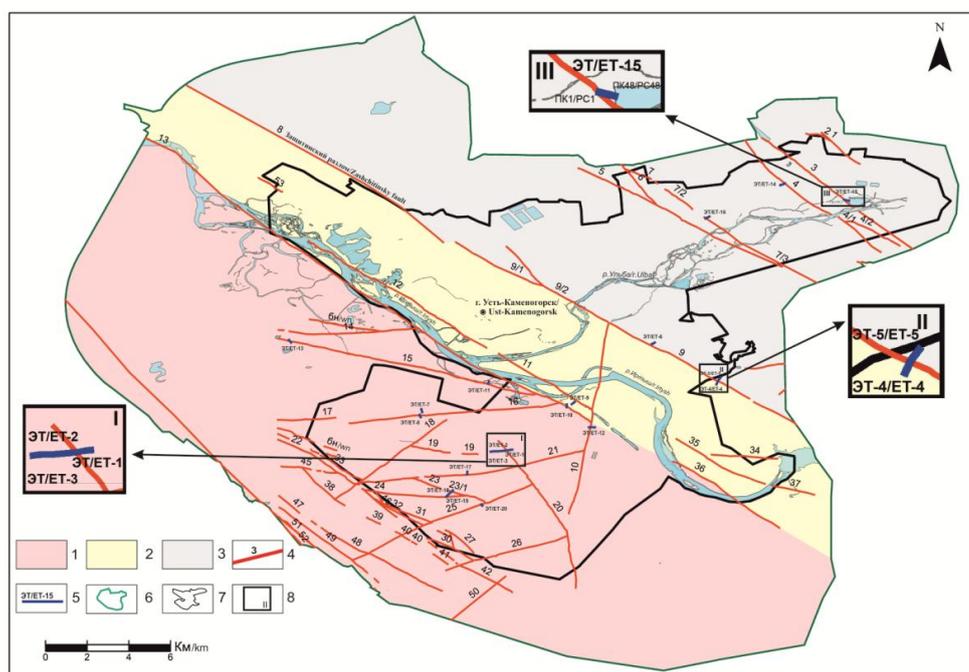


Рис. 1. Схема района работ: 1–3 – Иртышская зона смятия: 1– Юго-Западная подзона; 2 – Осевая подзона; 3 – Северо-Восточная подзона; 4 – разрывные нарушения и их номера; 5 – профили электротомографических исследований и их номера; 7 – кадастровая граница г. Усть-Каменогорск, 8 – перспективная граница г. Усть-Каменогорск, 9 – участки исследований и их номера /
 Fig. 1. Scheme of the work area: 1–3 – Irtysh crumpling zone: 1– Southwestern subzone; 2 – Axial subzone; 3 – Northeastern subzone; 4 – discontinuous faults and their numbers; 5 – profiles of electrotomographic studies and their numbers; 7 – cadastral boundary of Ust-Kamenogorsk, 8 – perspective border of Ust-Kamenogorsk, 9 – research sites and their numbers

Основные разломы (Усть-Каменогорский, Защитинский и др.) имеют северо-западное простирание. Вдоль Усть-Каменогорского разлома протягивается русло р. Иртыш. Среди разрывных нарушений наиболее широкое распространение имеют продольные относительно ИЗС разломы, которые в комбинации с подчиненными поперечно-диагональными тектоническими разрывами обуславливают линейный или линзовидный складчато-блоковый характер ИЗС.

О проявлении современной геодинамической активности разломов свидетельствуют многочисленные балки, овраги, береговые уступы рек, фиксирующие изменения положения базисов эрозии, а также результаты недавних исследований соседних регионов [Шалагинов, Неведрова, 2015; Кузина и др., 2023; Санчаа, Неведрова, 2023 и др.]. На это же указывают продольные и поперечные профили рек Иртыша и Ульбы, изобилующие пережимами и сужениями, а также весьма неравномерная мощность аллювиальных отложений вследствие блокового строения подстилающих горных пород. На негативное влияние геодинамических процессов на геозкологическое состояние территорий неоднократно обращалось внимание в работах [Sengör et al., 1993; Маркин и др., 2016; Чотчаев и др., 2020; Заалишвили и др., 2022].

Работы проводились методом электротомографии (ЭТ). Выполнен дипольный, шлюмберже и прямой (обратный) трехэлектродный тип установки методом сопротивлений. Наблюдаемое электрическое поле, нормированное по параметрам установки до такой степени, чтобы кажущееся сопротивление совпадало с истинным удельным сопротивлением, называется кажущимся удельным электрическим сопротивлением (ρ_k). Кажущееся удельное электрическое сопротивление рассчитывается исходя из разности потенциалов между приемными электродами тока в питающей линии и геометрического коэффициента установки. Таким образом, кажущееся удельное электрическое сопротивление зависит не только от геометрических параметров аномальных зон и их характеристик удельного электрического сопротивления, но и от параметров установки измерения. Метод ЭТ позволяет исследовать сложно построенные среды и проводить интерпретацию в рамках двумерных моделей. Различные варианты использования ЭТ подробно описаны в работах [Griffiths, Barker, 1993; Loke, Barker, 1995; Ritz et al., 1999; Тарасов и др., 2015; Парада, 2018; Бобачев и др., 2006; Бобачев, Шевнин, 2022; и др.]. При этом вынос электрода «бесконечность» производился на расстояние 5 м и более (до 500 м) перпендикулярно линии профиля. Во избежание индуктивных наводок в приемной линии использовался режим измерений на частоте 1,22–4,88 Гц с уровнем полезного сигнала не менее 5 мВ. Электротомографические профили выполнены с использованием 48-канальной установки и шагом между электродами 5 м. Максимальная длина расстановки, в зависимости от геоэлектрических условий и линейных размеров участков составила 235 м. Глубина исследования от 35 до 60 м. Работы были выполнены многоэлектродной электро-разведочной станцией СКАЛА 48К12. Привязка точек начала и конца профилей ЭТ осуществлялась с помощью спутникового приемника Garmin GPS MAP. Инверсия данных электротомографии производилась с применением программного обеспечения ZondRes2D.

Результаты и обсуждение

Согласно рис. 1 участок I расположен в пределах Юго-Западной подзоны ИЗС. На данном участке выполнен профиль электротомографии общей протяженностью 690 метров, пересекающий разлом под № 20. Согласно полевым наблюдениям и анализу космических снимков разлом № 20 является сдвигом, его протяженность составляет 9379 км, азимут падения – 221°, угол падения – 77°.

Томографический разрез участка по профилю 1 (ЭТ-1 на рис. 1) представлен двумя геоэлектрическими слоями (рис. 2). Первый слой выделен с поверхности, залегает до глубины 10–15 м и представлен суглинками лессовидными и глинами. Значения кажущегося электрического сопротивления (ρ_k) слоя составили от 10 до 60 Ом·м. Второй геоэлектрический слой подстилает первый и прослеживается до глубины 35–45 м. Значения ρ_k слоя составили 90–200 Ом·м. Слой представлен дресвяно-щебенистым грунтом с суглинистым, супесчаным заполнителем.

Геоэлектрический разрез по профилю 2 (ЭТ-2) представлен тремя геоэлектрическими слоями (рис. 2). Первый слой выделен с поверхности в левой части профиля, залегает до глубины 15–20 м, представлен суглинками лессовидными и глинами. Значения ρ_k слоя составили от 10 до 60 Ом·м. Второй геоэлектрический слой залегает с поверхности по всей длине профиля и подстилает первый слой в левой части профиля. Мощность слоя меняется от 20 до 40 м. Значения ρ_k слоя составили 90–400 Ом·м. Слой предположительно представлен дресвяно-щебенистым материалом с суглинистым и супесчаным заполнителем. В районе 70 пикета профиля с глубины 15–20 м выделен третий геоэлектрический слой со значением ρ_k 600–1400 Ом·м. Слой подстилает дресвяно-щебенистые отложения и представлен выветрелыми, трещиноватыми гранитами и гранодиоритами. Мощность слоя составила около 30–35 м.

Геоэлектрический разрез по профилю 3 (ЭТ-3) представлен тремя геоэлектрическими слоями (рис. 2). Первый слой выделен с поверхности, залегает до глубины 7–10 м, предположительно представлен дресвяно-щебенистым материалом с суглинистым, супесчаным заполнителем. Значения кажущегося электрического сопротивления (ρ_k) слоя составили от 200 до 600 Ом·м. Второй геоэлектрический слой подстилает первый слой. Мощность второго слоя меняется от 10 до 40 м, значения ρ_k составили 600–1400 Ом·м. Слой представлен выветрелыми, трещиноватыми гранитами и гранодиоритами. Ниже по разрезу выделен третий геоэлектрический слой. В левой части профиля кровля третьего слоя залегает с глубины 20–25 м и погружается к середине профиля до глубины 50–60 м. Значения ρ_k слоя находятся в диапазоне от 1800 до 3000 Ом·м. Слой представлен слабо выветрелыми гранитами и гранодиоритами.

На электротомографическом разрезе по профилю 2 отмечается довольно контрастный переход между породами с ненарушенной структурой и раздробленным материалом, выполняющим сместитель разлома. Мощность такой зоны по горизонтали составляет 70 метров.

Согласно рис. 1 участок II расположен в пределах Осевой подзоны ИЗС. На данном участке выполнено два профиля электротомографии 4 и 5 (ЭТ-4 и ЭТ-5) общей протяженностью 460 метров. Профили электротомографии выполнены с перекрытием на конечных электродах, имеют общее направление с северо-востока на юго-запад, вкрест простирания разрывного нарушения № 9. Согласно данным полевым наблюдений и анализа космоснимков, общая протяженность разлома порядка 8924 км,

в кинематическом отношении разлом представлен сдвигом с азимутом простирания – 220°, азимутом падения – 130°, углом падения – 75°.

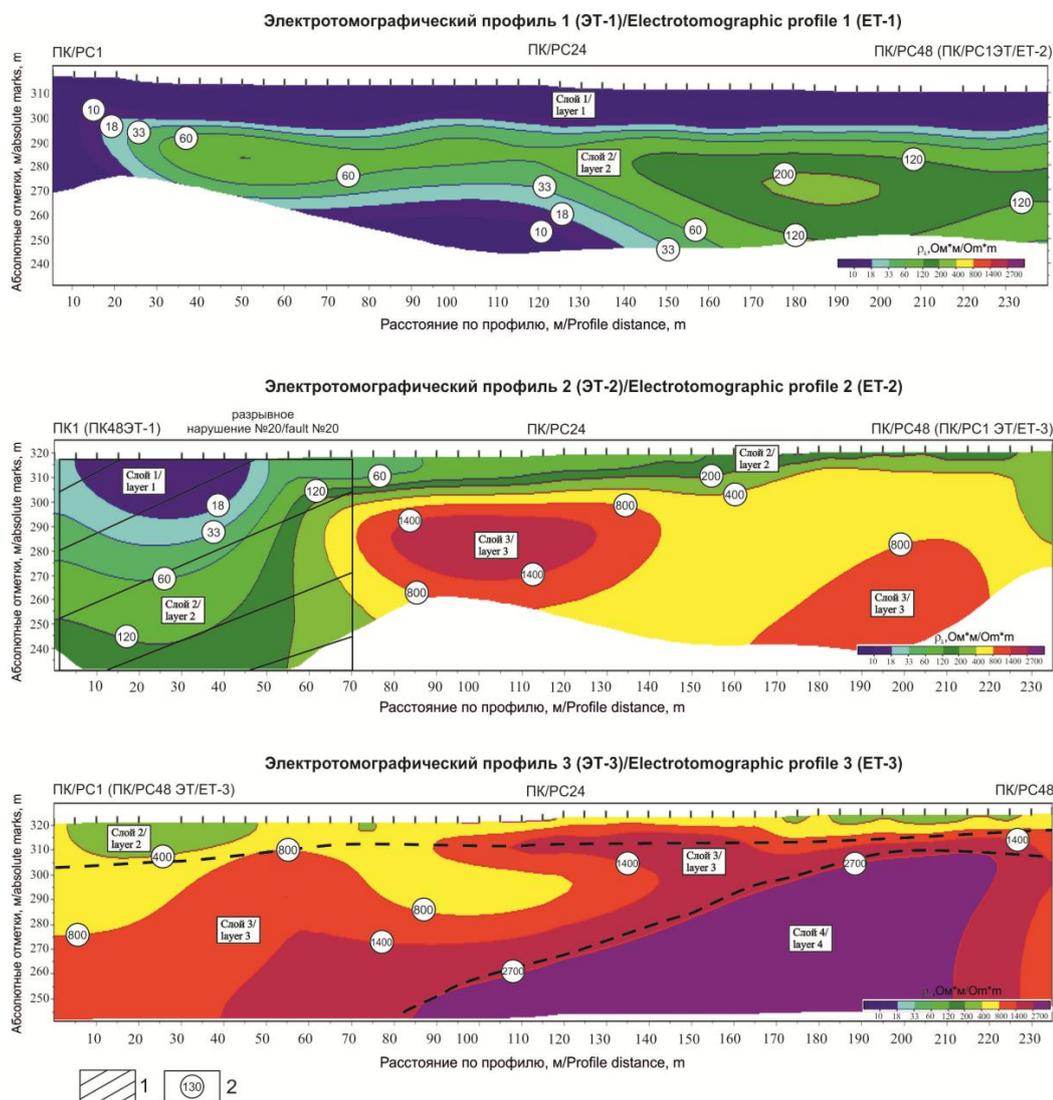


Рис. 2. Результаты электротомографических исследований в пределах эталонного участка I: числа в кружках – значение кажущегося электрического сопротивления в Ом·м; косая штриховка на профиле 2 – зона разрывного нарушения /

Fig. 2. The results of electrotomographic studies within the reference area I: the numbers in circles are the value of the apparent electrical resistance in Ohm·m; oblique hatching on profile 2 is the zone of discontinuity

Геоэлектрический разрез по профилям 4 и 5, согласно рис. 3, представлен двумя геоэлектрическими слоями. Первый слой выделен с поверхности до глубины 5–10 м и простирается по латерали до середины профиля 5 (ЭТ–5); представлен дресвяно-щебенистым грунтом с суглинистым, супесчаным заполнителем. Значения ρ_k слоя составили от 250 до 500 Ом·м. Второй геоэлектрический слой подстилает первый слой, в центральной и левой части профиля 5 (ЭТ–5); выделен с поверхности. Глубина залегания слоя прослеживается до 60 м. Значения ρ_k слоя составили 600–1400 Ом·м. Слой представлен выветрелыми, трещиноватыми гранитами, гранодиоритами.

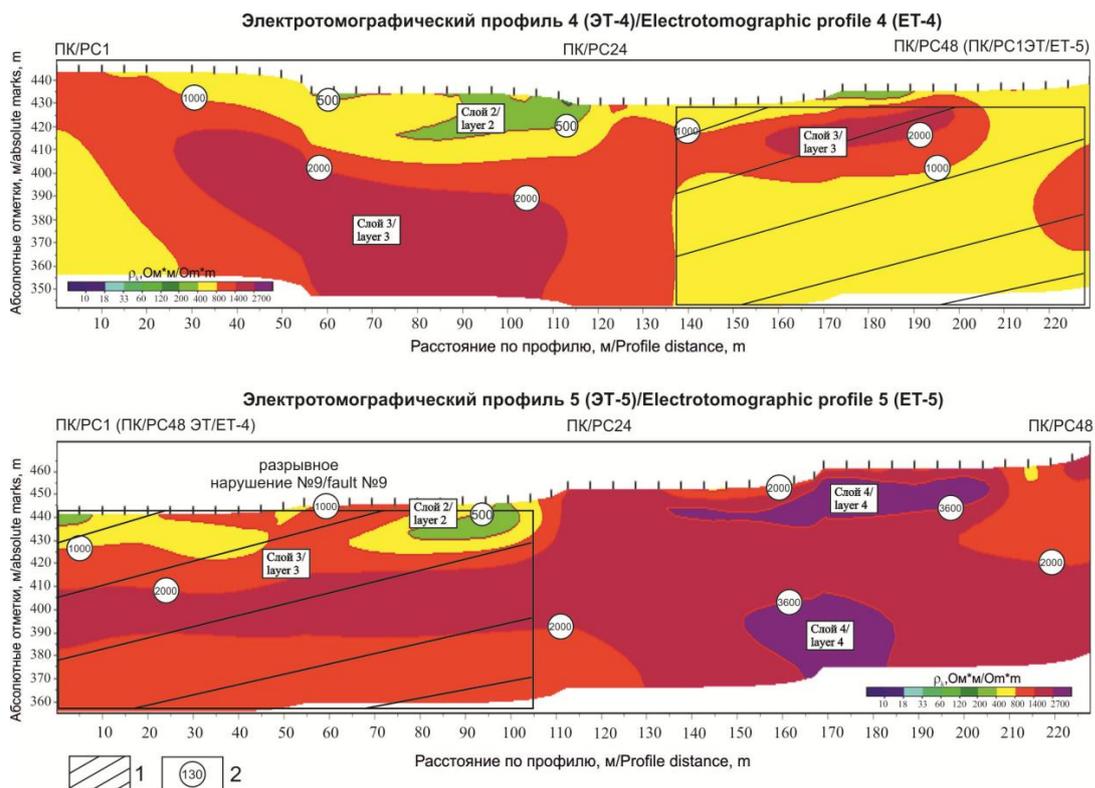


Рис. 3. Результаты электротомографических исследований в пределах эталонного участка II: пояснения смотрите на рис. 2 /

Fig. 3. The results of electrotomographic studies within the reference area II: for explanations, see Fig. 2

В левой части профиля 5 выделены высокоомные области со значениями ρ_k от 2500 до 3800 $\text{Om}\cdot\text{m}$, представленные менее трещиноватыми, более прочными гранитами и гранодиоритами. Протяженность аномальной области высокоомного участка в пределах разрывного нарушения № 9 составляет до 195 м.

Участок III расположен в границах северо-восточной подзоны ИЗС (рис. 1). На данном участке выполнен профиль электротомографии ЭТ–15, расположенный вкрест простирания разрывного нарушения №3 (рис. 4).

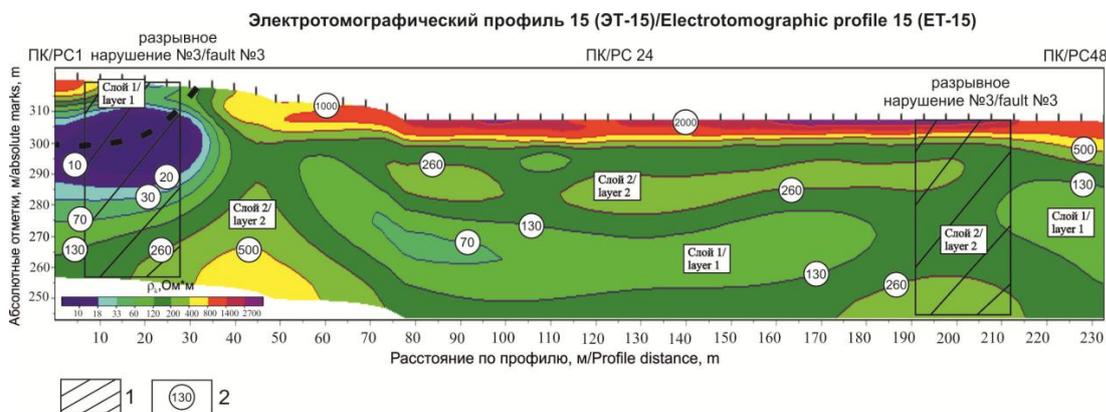


Рис. 4. Результаты электротомографических исследований в пределах эталонного участка III: пояснения смотрите на рис. 2 /

Fig. 4. The results of electrotomographic studies within the reference area III: for explanations, see Fig. 2

Согласно данным полевых маршрутов и анализа космоснимков общая протяженность разлома порядка 9348 км, по кинематическому типу разлом отнесен к сдвигу. Азимут простирания разлома – 300°, азимут падения – 210°, угол падения – 72°.

Значения ρ_k по профилю 15 (ЭТ–15) составляют от 130 до 450 Ом·м. Согласно геологической карте данного района с поверхности сместитель разлома выполнен галечниковыми отложениями с супесчаным заполнителем. Местами по разрезу выделены низкоомные области со значением ρ_k 15–25 и 40–80 Ом·м. Области с такими значениями ρ_k предположительно связаны с заполнением сместителя разлома суглинистым и глинистым материалом. Юго-Западная ветвь разрывного нарушения № 3 в интервале от ПК6 до ПК29 характеризуется низкими значениями ρ_k , что обусловлено наличием в сместителе разлома суглинистого материала. Для Северо-Восточной его ветви в районе ПК 39 – 45 характерны более высокие значения ρ_k .

Выводы

1. Малоуглубленная электротомография, использованная в пределах г. Усть-Каменогорска, позволила изучить особенности проявления и отражения разрывных нарушений в современных рыхлых отложениях.

2. Изученные разрывные нарушения характеризуются в основном северо-западным простиранием и крутыми углами наклона сместителя.

3. Горные породы в зонах разрывных нарушений раздроблены до состояния щебня, дресвы и глины с включениями новообразованных кварцево-кальцитовых жил и прожилков.

4. Величина кажущегося электрического сопротивления определяется главным образом типом и степенью тектонической и современной экзогенной разрушенности пород, выполняющих сместитель разлома, что связано с периодической активизацией изученных разломов и малоамплитудными подвижками по сместителю.

5. Использованный метод электротомографии позволяет получить достаточно полное представление о строении разрывного нарушения в условиях отсутствия его выхода на поверхность.

Литература

1. Бобачев А.А., Шевнин В.А. Влияние приповерхностного слоя геологического разреза на результаты методов сопротивлений и вызванной поляризации. // Геофизика. – 2022. – № 6. – С. 43–48. DOI: 10.34926/geo.2022.43.40.006.

2. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 2. – С. 14–17.

3. Буслов М.М. Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса: роль позднепалеозойских крупноамплитудных сдвигов. // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. № 1. – С. 66–90.

4. Ермолов П.В., Полянский Н.В. Основные этапы тектонического развития Иртышской зоны смятия: по данным изотопного анализа циркона методом ШРИМП. // Геология и охрана недр. – 2008. – № 3. Вып. 28. – С. 17–24.

5. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Харебов К.С. Инструментальная мера сейсмической интенсивности по данным сети К-NET. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. № 2. – С. 331–340. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-331-340.

6. Кузина З.Я., Неведрова Н.Н., Санчаа А.М. Особенности строения верхней части разреза Уймонской впадины Горного Алтая по данным электротомографии с использованием

трехмерных программных средств. // Вестник МГТУ. – 2023. – Т. 26. № 2. – С. 160–169. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-160-169.

7. Маркин М.Ю. Оценка объемной активности радона тектонических разломов в границах городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 29–39. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.0038.

8. Маркин М.Ю., Парада С.Г., Шишкалов И.Ю. Состав и строение Малкинского ультрабазитового массива по результатам переинтерпретации аэромагнитных данных (Кабардино-Балкарская Республика). // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 3. – С. 98–110.

9. Парада С.Г. Выявление признаков золотого оруденения на основе выделения фоновых и локальных составляющих электрических полей в Восточной части Передового хребта (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 4. – С. 126–40.

10. Санчаа А.М., Неведрова Н.Н. Геоэлектрическое строение Гусиноозерской и сопредельных впадин Западного Забайкалья по результатам интерпретации архивных данных ВЭЗ. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. – № 3. Вып. 55. – С. 59–69. DOI: 10.20403/2078-0575-2023-3-59-69.

11. Семинский К.Ж., Зарипов Р.М. Нарушенность скального массива и поле удельного электрического сопротивления в близповерхностной части земной коры тектонически активных регионов (на примере Западного Прибайкалья). // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2016. – Т. 57. № 4. – С. 30–42.

12. Тарасов В.А., Емкужев М.С., Парада С.Г., Столяров В.В. Геофизические методы при поисках золоторудной минерализации на флангах Тырнаузского рудного узла. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2015. – № 1. – С. 109–117.

13. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 4. – С. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.0059.

14. Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н. Геоэлектрическое строение участка регулярных наблюдений за электромагнитными параметрами в Чуйской впадине Горного Алтая. // Вестник Алтайской науки. – 2015. – № 2. – С. 310–318.

15. Conti L., Picozza P., Sotgiu A. A Critical Review of Ground Based Observations of Earthquake Precursors. // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – No. 9. – Article 676766. DOI: 10.3389/feart.2021.676766.

16. Griffiths D.H., Barker R.D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. // *Journal of Applied Geophysics*. – 1993. – Vol. 29. – pp. 211–226.

17. Loke M.H., Barker R.D. Least-Squares Deconvolution of Apparent Resistivity Pseudosections. // *Geophysics*. – 1995. – Vol. 60. No. 6. – pp. 1682–1690.

18. Ritz M., Robain H., Pervago E. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of nearsurface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. // *Geophysical Prospecting*. – 1999. – Vol. 47. No. 2. – pp. 85–101.

19. Sengör A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S. Evolution of the Altiid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. // *Nature*. – 1993. – Vol. 364. – pp. 299–307.

References

1. Bobachev A.A., Shevnin V.A. Near-surface layer effect of a geological section on results of resistivity and induced polarization methods. *Geophysics*. 2022. No. 6. pp. 43–48. DOI: 10.34926/geo.2022.43.40.006. (In Russ.)

2. Bobachev A.A., Gorbunov A.A., Modin I.N., Shevnin V.A. Electrotomography by the method of resistance and induced polarization. *Instruments and systems of exploration geophysics*. 2006. No. 2. pp. 14–17. (In Russ.)

3. Buslov M.M. Tectonics and geodynamics of the Central Asian Foldbelt: the role of Late Paleozoic large-amplitude strike-slip faults. *Russian Geology and Geophysics*. 2011. T. 52. No. 1. pp. 52–71. (In Russ.)

4. Ermolov P.V., Polyansky N.B. The main stages of the tectonic development of the Irtysh crushing zone: according to the isotope analysis of zircon by the SHRIMP method. *Geology and bowels of the earth*. 2008. No. 3. Issue 28. pp. 17–24. (In Russ.)

5. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Kharebov K.S. Instrumental measure of seismic intensity according to K-NET data. *Sustainable development of mountain areas*. 2022. Vol. 14. No. 2. pp. 331–340. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-331-340. (In Russ.)

6. Kuzina Z.Ya., Nevedrova N.N., Sanchaa A.M. Structural features of the upper part of the Uymon depression section of the Altai Mountains according to electrotomography data using three-dimensional software tools. *Vestnik of MSTU*. 2023. Vol. 26. No. 2. pp. 160–169. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-260-169. (In Russ.)

7. Markin M.Yu. Assessment of radon volumetric activity of tectonic faults within the boundaries of the Ust-Kamenogorsk urban agglomeration (Republic of Kazakhstan). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 29–39. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.0038. (In Russ.)

8. Markin M.Yu., Parada S.G., Shishkalov I.Yu. Composition and structure of the Malkin ultrabasite massif based on the results of reinterpretation of aeromagnetic data (Kabardino-Balkarian Republic). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2016. No. 3. pp. 98–110. (In Russ.)

9. Parada S.G. Revealing indications of golden mineralization on the base of isolation of the background and local components of electric fields at the eastern part of the foremost ridge (North Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2018. No. 4. pp. 126–40. (In Russ.)

10. Sanchaa A.M., Nevedrova N.N. Geoelectrical structure of the Gusinoozerskaya and adjacent depressions of Western Transbaikalia based on archival data vertical electrical soundings interpretation. *Geology and mineral resources of Siberia*. 2023. No. 3. Issue 55. pp. 59–69. DOI: 10.20403/2078-0575-2023-3-59-69. (In Russ.)

11. Seminskiy K.Zh., Zaripov R.M. Rock massif fracturing and the field of specific electrical resistivity in the near-surface Earth crust in tectonic active regions (on example of West Pribaikalie). In: *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2016. Vol. 57. No. 4. pp. 30–42. DOI: 10.21285/0130-108X-2016-57-4-30-42. (In Russ.)

12. Tarasov V.A., Emkuzhev M.S., Parada S.G., Stolarov V.V. Geophysical methods in exploration of gold-bearing mineralization within the flanks of the Tynnyauz ore cluster. *Proceedings of Voronezh state university. Series: Geology*. 2015. No. 1. pp. 109–117. (In Russ.)

13. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005. (In Russ.)

14. Shalaginov A.E., Nevedrova N.N. The geoelectric structure of the site of regular observations of electromagnetic parameters in the Chui depression of the Altai mountains. *Bulletin of Altai Science*. 2015. No. 2. pp. 310–318. (In Russ.)

15. Conti L., Picozza P., Sotgiu A. A Critical Review of Ground Based Observations of Earthquake Precursors. *Frontiers in Earth Science*. 2021. No. 9. Article 676766. DOI: 10.3389/feart.2021.676766.

16. Griffiths D.H., Barker R.D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*. 1993. Vol. 29. pp. 211–226.

17. Loke M.H., Barker R.D. Least-Squares Deconvolution of Apparent Resistivity Pseudosections. *Geophysics*. 1995. Vol. 60. No. 6. pp. 1682–1690.

18. Ritz M., Robain H., Pervago E. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of nearsurface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. *Geophysical Prospecting*. 1999. Vol. 47. No. 2. pp. 85–101.

19. Sengőr A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*. 1993. Vol. 364. pp. 299–307.