

УДК 550.837.31+550.8.05
DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4503
Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Вариации удельного электрического сопротивления как результат проявления природно-техногенных геодинамических процессов в Горловской впадине Алтае-Саянской складчатой области по данным электротомографии

А.Е. Шалагинов[✉], Н.Н. Неведрова, И.О. Шапаренко, А.В. Мариненко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, г. Новосибирск

[✉]ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Актуальность. В последнее десятилетие существенно выросла интенсивность разработки Горловского угольного месторождения в Новосибирской области, что приводит к формированию сейсмической активизации недр Горловской впадины в ответ на техногенное воздействие. Начиная с 2019 г. в районе месторождения фиксируются землетрясения с магнитудой более 4, ощутимые в г. Новосибирске и его пригородах. В настоящее время ущерб от природных катастроф стремительно растет. Это обусловлено многими причинами, такими как урбанизация, техногенные изменения геологической среды, возведение объектов повышенного риска, способствующих активизации негативных процессов. Поэтому разработка достоверных научно-обоснованных критериев оценки, прогноза и последствий природных и природно-техногенных опасных явлений является актуальной задачей. Своевременное выявление опасных геологических процессов позволит разработать и реализовать меры по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и природно-техногенного характера. **Цель.** Анализ результатов регулярных наблюдений методом электротомографии по профилю, пересекающему разломную зону, на участке исследования в Горловском прогибе для дальнейшей разработки методики измерения и программных средств автоматизированной обработки и инверсии данных мониторинга методом электротомографии. **Методы.** Полевые измерения, количественная интерпретация. **Результаты и выводы.** Представлены первые результаты регулярных наблюдений методом электротомографии по профилю, пересекающему разломную зону, на участке исследования в Горловском прогибе, полученные при инверсии полевых данных с помощью модернизированного программного комплекса DiInSo. Выявлены вариации геоэлектрических параметров, которые отражают реакцию геологической среды не только на происходящие за период наблюдений землетрясения, но и на техногенные воздействия (взрывы). Кроме того, показано, что величина вариаций зависит от магнитуды землетрясения.

Ключевые слова: Горловская впадина, Новосибирская область, природно-техногенные геодинамические процессы, геофизический мониторинг, электротомография, вариации геоэлектрических параметров, методика измерений, программные средства, инверсия

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-10050, <https://rscf.ru/project/23-27-10050/>

Для цитирования: Вариации удельного электрического сопротивления как результат проявления природно-техногенных геодинамических процессов в Горловской впадине Алтае-Саянской складчатой области по данным электротомографии / А.Е. Шалагинов, Н.Н. Неведрова, И.О. Шапаренко, А.В. Мариненко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 11. – С. 32–43. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4503

UDC 550.837.31+550.8.05
DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4503

Electrical resistivity variations as a result of natural-technogenic seismicity in the Gorlovka depression of the Altai-Sayan folded region according to electrical tomography data

A.E. Shalaginov[✉], N.N. Nevedrova, I.O. Shaparenko, A.V. Marinenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

[✉]ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. In the last decade, the intensity of development of the Gorlovka coal deposit in Novosibirsk region has significantly increased, which leads to the formation of seismic activation of the subsoil of the Gorlovka depression in response to technogenic impact. Since 2019, earthquakes with a magnitude of more than 4 have been recorded in the field area, felt in Novosibirsk and its suburbs. Currently, damage from natural disasters has been rapidly growing. This happens due to many reasons, such as urbanization, population growth, man-made changes in the geological environment, construction of high-risk facilities that contribute to the activation of negative processes. Therefore, the development of trustworthy criteria for the assessment, forecast and consequences of natural and man-made hazardous phenomena is an urgent task. Timely identification of dangerous geological processes will make it possible to develop and implement measures to prevent and eliminate emergencies of a natural and man-made nature. **Aim.** Analysis of the results of regular observations by electrical tomography along a profile crossing the fault zone at the study site in the Gorlovka trough for further development of measurement techniques and software for automated processing and interpretation of monitoring data. **Methods.** Field works, quantitative interpretation **Results and conclusions.** The authors have obtained the first results of regular observations using electrical tomography along a profile crossing the fault zone at the study site in the Gorlovka trough, interpreting field data using the modernized DilnSo software package. It was found that the identified variations in geoelectric parameters reflect the response of the geological environment both to earthquakes occurring during the observation period and to man-made impacts (explosions). Furthermore, it is demonstrated that the fluctuations magnitude is influenced by the earthquake magnitude.

Keywords: Gorlovskaya depression, Novosibirsk region, natural-technogenic seismicity, geophysical monitoring, electrical tomography, geoelectrical parameters variation, measurement technique, software tools, inversion

Acknowledgements: The study was funded by the Russian Science Foundation no. 23-27-10050, <https://rscf.ru/project/23-27-10050/>

For citation: Shalaginov A.E., Nevedrova N.N., Shaparenko I.O., Marinenko A.V. Electrical resistivity variations as a result of natural-technogenic seismicity in the Gorlovka depression of the Altai-Sayan folded region according to electrical tomography data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 11, pp. 32–43. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4503

Введение

Горловский прогиб расположен на правом берегу р. Оби в юго-восточной части Новосибирской области, в 100 км к югу от г. Новосибирска, на юге Искитимского района. Эта узкая впадина шириной всего от 2 до 15 км и длиной около 120 км разделяет северо-западную часть Салаирского антиклинория и Колывань-Томскую складчатую зону. На территории впадины разведаны уникальные месторождения антрацита. Их промышленная разработка начата еще в 1930 г., вначале открытым способом и далее в 1980–1990 г. разрабатывались месторождения как в шахтах (Листвянское), так и на разрезах (Горловское, Ургунское). В настоящее

время в разработке Колыванское (Северный, Крутихинский, Восточный участки), Ургунское и Горловское месторождения [1, 2]. Уровень добычи постоянно растет.

Сейсмологами Алтае-Саянского филиала Единой Геофизической службы РАН в последние годы зафиксирован целый ряд землетрясений с магнитудами, достигающими 4 и более единиц, непосредственно на территории Горловской впадины. Значительное число эпицентров этих событий приурочены к районам интенсивной добычи угля открытым способом. По мнению сейсмологов, в последнее время повысилась наведенная сейсмичность данного региона, т. е. усиление сейсмической ак-

тивности связано не только с природными, но и с техногенными воздействиями. Большая часть гипоцентров происходящих землетрясений находится на глубинах менее 8 км с характерным механизмом (взброс) [3].

График повторяемости землетрясений в Горловской впадине имеет иной наклон, чем для природных землетрясений Алтае-Саянской горной области. Учитывая высокую интенсивность добычи антрацита, а также аналогию по механизмам очагов с техногенными землетрясениями Кузбасса, сейсмологи предполагают, что землетрясения с эпицентрами вблизи угольных карьеров связаны с техногенной сейсмичностью, которая является результатом изменения природного напряженного состояния геосреды при сильном антропогенном воздействии на неё. Учитывая возросший уровень сейсмичности и увеличивающиеся масштабы добычи угля в этом районе, нельзя исключить развитие сейсмического процесса до более существенных магнитуд. Нагрузки на вмещающую среду, обусловленные техногенным воздействием, не успевают перераспределяться в массиве горных пород, что способно существенно повысить сейсмичность этой территории. При этом создается реальная опасность для промышленной и жилой инфраструктуры. Ощутимые землетрясения, происходящие в районе крупных населенных пунктов и предприятий повышенной ответственности, требуют внимательного изучения их генезиса и создаваемой сейсмической опасности. Очевидно, что в данной ситуации независимо от природы землетрясений актуальны регулярные наблюдения за развитием геодинамических процессов в Горловской впадине [4, 5].

По многолетним наблюдениям на прогностических полигонах во многих странах мира было выявлено, что наблюдаются вариации геофизических полей, в том числе и электромагнитных, связанные с процессами подготовки сейсмических событий [6–10]. Анализ результатов показал, что к одному из эффективных прогностических наблюдений относится мониторинг на постоянном токе [11–14]. В последнее время электротомография все чаще применяется в задачах мониторинга различных геологических процессов [15–17].

В настоящее время Горловский прогиб относится к недостаточно изученным районам Алтае-Саянской области. Геофизические работы проводились только в 70-х гг. прошлого столетия. В 2020 г. сотрудниками лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН начаты измерения комплексом методов наземной электроразведки для изучения геоэлектрического строения Горловского прогиба с целью получения геоэлектрических характеристик

отложений осадочного выполнения, выявления разломных структур [18, 19]. В 2023 г. на основе полученных сведений о строении и дополнительных опытно-методических работ в период с мая по ноябрь были выполнены мониторинговые наблюдения методом электротомографии (ЭТ) по профилю, пересекающему одно из юго-восточных разломных ограничений Горловского прогиба.

Целью данной статьи является анализ результатов регулярных наблюдений методом ЭТ по профилю, пересекающему разломную зону, на участке исследования в Горловском прогибе для дальнейшей разработки методики измерения и программных средств автоматизированной обработки и инверсии данных мониторинга методом ЭТ. Обработка, интерпретация и анализ данных мониторинга методом ЭТ осуществляется с использованием модернизированного программного комплекса моделирования и инверсии Direct-Inverse-Solver (DiInSo). Этот комплекс, предназначенный ранее для решения прямых 3D и обратных 2D/3D задач ЭТ, был дополнен графом обработки данных мониторинга на основе теоретического анализа разных схем регуляризации [20]. В статье приведены результаты интерпретации полевых данных мониторинга с помощью новой версии программы DiInSo.

Выбор участка исследования основывался на анализе предшествующих результатов многолетних регулярных наблюдений в сейсмоактивной зоне Горного Алтая. Из анализа получено, что именно в зонах влияния разломов по величине вариаций геоэлектрических параметров можно выделить активные и потенциально сейсмогенерирующие разломы, в области которых может произойти крупное землетрясение [21]. Таким образом, был выбран участок, где по данным методов электроразведки выделена разломная структура, положение которой хорошо согласуется с геологическими данными. Участок исследования находится в районе п. Легостаево Искитимского района Новосибирской области в сейсмоактивной зоне Горловского прогиба, где в последние годы происходят сейсмические события с магнитудой 3–4 и более [22].

Геологическое и гидрогеологическое строение участка исследования

Геологические данные и сведения о гидрогеологии используются в качестве априорных как на этапе полевых работ, так и в ходе интерпретации полевых данных электроразведки, а также для верификации результатов. Горловский прогиб расположен между северо-западной окраиной Салаирского кряжа и Кольвань-Томской складчатой зоной, длительное развитие которых оказало огромное влияние на его строение. В Кольвань-Томской складчатой области, оформившейся в эпоху гер-

цинской складчатости, происходили активные тектонические движения, а Салаирский кряж являлся упором, как жесткая консолидированная глыба. Эти факторы сказались на конфигурации Горловского прогиба, вытянутого по простиранию с небольшой шириной. Для него характерна высокая напряженность тектонических деформаций.

По современным геологическим представлениям Горловский прогиб – узкая грабен-синклиналь, протянутая с северо-востока на юго-запад. Локальные складки вдоль простирания впадины часто являются запрокинутыми. В целом чередуются антиклинальные и синклинальные складки, осложненные складчатостью более мелких порядков с локальными разломами. Из-за расположенного здесь в раннем палеозое мелководного бассейна на территории прогиба возникло большое количество органогенных осадочных пород, таких как известняки, каменный уголь [2].

В геологическом строении района принимают участие отложения верхнего девона, карбона и перми, перекрытые мощной корой выветривания мел-палеогенового возраста, а также рыхлыми неогеновыми и четвертичными отложениями. Средняя

и нижняя части разреза представлены континентальными и морскими отложениями соответственно. Метаморфизм пермских углей достигает антрацитової стадии. Горловский угольный бассейн характеризуется крупнейшими в России запасами антрацита. Максимальная угленосность в Горловском прогибе приурочена к отложениям ранней перми, которые специалистами-геологами сопоставляются с аналогичными породами Кузбасса (рис. 1) [23].

Сопряжение Горловского прогиба с соседними региональными геологическими структурами происходит по крупным разломам. Горловский прогиб граничит с Салаирскими структурами по серии разломных нарушений (на разных участках) – Чемской, Доронинский и Томский разломы. От Кольвань-Томской зоны он отделен также разломной зоной, включающей Подъяковский и Митрофановский разломы. По геологическим и геофизическим данным разрывные нарушения являются надвигами юго-восточной вергентности. Для горных пород Горловского прогиба характерно развитие напряженной линейной складчатости и интенсивное расланцевание.

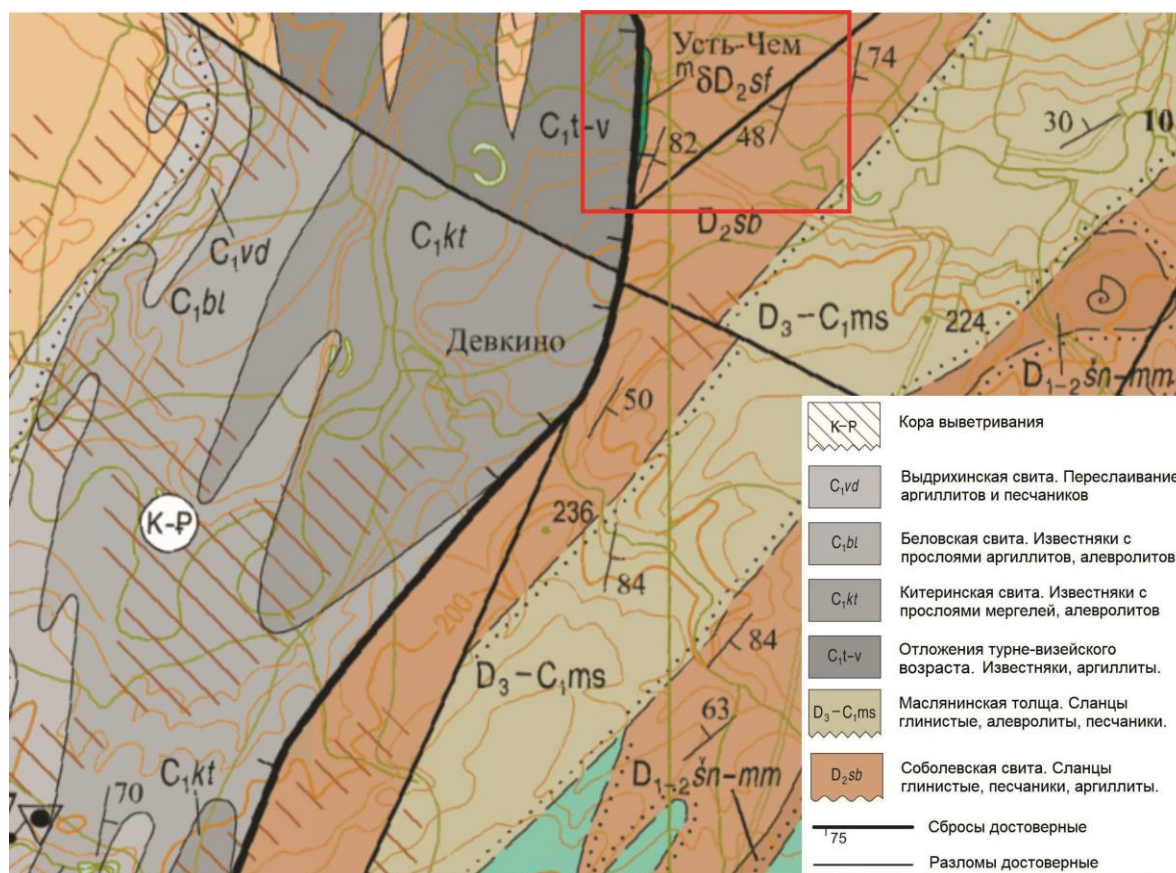


Рис. 1. Фрагмент государственной геологической карты Российской Федерации (масштаб 1:200000, лист N-44-XVIII, Черепаново) с указанием участка исследования

Fig. 1. Fragment of the state geological map of the Russian Federation (scale 1:200000, sheet N-44-XVIII, Cherepanovo) indicating the study area

Наиболее древняя система глубинных разрывных нарушений, развитых на площади работ, имеющая северо-восточное простирание, заложилась в конце раннего кембрия в инверсионную стадию каледонского цикла на фоне общего растяжения земной коры и интенсивно активизировалась в заключительную стадию герцинского цикла тектогенеза. Она представляет собой долгоживущие разрывные нарушения сбросового характера, отделяющие раннепалеозойские комплексы северо-западного Салаира от комплексов среднего-позднего палеозоя Горловской грабен-синклинали, к которым относится крупный Чемской разлом. Амплитуда разрывных нарушений по сместителю изменяется в широких пределах: от нескольких сотен метров до 3–5 км. Чемской разлом хорошо фиксируется по геологическим и геофизическим данным. В гравитационном поле ему соответствует градиентная зона, разделяющая область отрицательной аномалии над Горловским прогибом и региональной положительной аномалии над Салаиром. Еще более контрастно он отражается в магнитном поле, отделяя область повышенного знакопеременного поля на юго-востоке от более спокойного пониженного поля над Горловским прогибом, амплитуды смещений значительные.

Вторая система более мелких разрывных нарушений заложилась в орогенный этап развития Колывань-Томской структурной зоны. В обстановке сжатия формировались надвиговые структуры, в результате чего отложения Горловского прогиба были надвинуты на структуры северо-западного Салаира [23].

По гидрогеологическим характеристикам Горловская впадины относится к зоне сочленения Алтае-Саянской складчатой гидрогеологической области с Западно-Сибирским артезианским бассейном.

На её территории выделяются два водоносных комплекса – зон трещиноватости домезозойских образований и мезозойско-кайнозойских отложений. В водоносных горизонтах трещиноватых зон метаморфизованных и дислоцированных домезозойских отложений разного состава и возраста наблюдаются напорные и слабонапорные воды. Они питаются как за счет вертикальной фильтрации, так и за счет подтока с юго-восточных соседних областей Салаирского кряжа. Второй комплекс связан в основном с покровным кайнозойским чехлом, мощность которого колеблется, достигая на отдельных участках 50 и 150 м, и объединяет грунтовые и слабонапорные воды преимущественно четвертичных отложений. Питание подземных вод первых от поверхности водоносных отложений происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и таяния снега. Залегающие ниже подзем-

ные воды неогеновых отложений питаются за счет фильтрации грунтовых вод через разделяющие глинистые слои неогенового возраста или глины коры выветривания, что обуславливает их циркуляцию и накопление в зоне сочленения водоносного горизонта с водоупором. Оба водоносных комплекса местами гидравлически связаны между собой, местами разделены глинистыми породами коры выветривания палеозойских пород или неогеновыми глинами. Мощность водоупорных глин на отдельных участках достигает 100 м. Воды зон трещиноватости имеют доминирующее распространение на территории Горловской впадины и образуют единый домезозойский водоносный комплекс, который разделяется лишь по литологическим характеристикам отложений и тектоническим особенностям [23]. Подземные воды всех геологических подразделений впадины являются водами трещинного типа. На дневной поверхности воды проявляются в виде родников, восходящих источников с минерализацией 0,2–0,4 г/л из пород кольчугинской ($P_{2-3} kl$) и балахонской ($C_2-P_1 bl$) серий. Воды пород укропской свиты ($D_3 uk$) с минерализацией 0,5–0,6 г/л имеют меньшее распространение и не наблюдаются на поверхности, но вскрыты гидрогеологическими скважинами.

Методика наблюдений и программные средства обработки и интерпретации данных электротомографии

В результате анализа данных, полученных в Горловской впадине комплексом методов наземной электроразведки в 2022 г., в начале полевого сезона 2023 г. выбран участок в районе п. Легостаево Искитимского района Новосибирской области. На участке вначале были выполнены опытно-методические измерения методом ЭТ, целью которых являлся выбор установки, шага между электродами и места размещения профиля наблюдений для осуществления мониторинговых наблюдений.

Участок расположен в зоне перехода от отложений турне-визейского возраста ($C_1 t-v$) Горловской впадины через её юго-восточное разломное ограничение к отложениям соболевской свиты ($D_2 sb$) Салаирского кряжа. Конкретное место расположения профиля ЭТ было выбрано экспериментально, руководствуясь геологическими данными и путем измерений по профилям, пересекающим разломную структуру в нескольких местах. Окончательное местонахождение мониторингового профиля зафиксировано там, где разлом хорошо выделяется в геоэлектрическом разрезе в виде низкоомной зоны. На основе анализа большого количества полевых данных, полученных авторами на участках регулярных наблюдений в сейсмоактивной зоне Горного Алтая, именно в разрезах с присутствием низ-

коомных разломных зон выявлены значимые вариации удельного электрического сопротивления (УЭС), связанные с усилением сейсмической активности [22]. На выбранном участке профиль измерений пересекает оперяющийся разлом Чемского разломного нарушения в 4 км западнее п. Легостаево и находится в 5–7 км от области концентрации сейсмических событий в Горловской впадине (рис. 2).

Электротомография – это целый комплекс, включающий в себя как методику полевых наблюдений, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных. Особенностью метода ЭТ, отличающей ее от стандартных методов вертикальных электрических зондирований, является многократное использование в качестве питающих и измерительных одних и тех же фиксированных на профиле наблюдений положений электродов, что приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при значительном увеличении плотности измерений. Такой подход с одной стороны позволяет работать с современной высокопроизводительной аппаратурой, применяя эффективные алгоритмы моделирования и инверсии, с другой – выполнять интерпретацию данных ЭТ в рамках двумерных и трехмерных моделей [24].

Измерения методом ЭТ выполнены с использованием многоэлектродной электроразведочной аппаратуры «Скала 48», в которую входят генератор,

измеритель и коммутатор тока в одном корпусе. А также два 24-х электродных кабеля с шагом 5 м между электродами, при подключении которых можно получить данные для построения геоэлектрического разреза по профилю длиной 235 м. Такой шаг между электродами вместе с используемой установкой «Шлюмберже» обеспечивает необходимую детальность измерений и глубинность исследования до 40 м. Регулярные наблюдения проведены с интервалом ~ в 2 недели между измерениями, по заранее размеченному профилю с неизменным положением электродов.

При интерпретации полевых данных электроразведки использовались априорные сведения об электрофизических характеристиках горных пород, полученные лабораторными и скважинными методами. Для низкоомных угольных отложений УЭС получено от единиц до 20 Ом·м (по каротажу скважин), у перекрывающей кузнецкой свиты УЭС до 100 Ом·м. Все стратиграфические подразделения, подстилающие угленосную толщу, имеют высокое УЭС (сотни и тысячи Ом·м). Максимально высокие УЭС у карбонатных пород, грубозернистых песчаников, несколько ниже у глинисто-сланцевых пород (верхний девон и нижний карбон), у рыхлых отложений УЭС составляет 20–40 Ом·м, для отложений коры выветривания УЭС изменяется от 9 до 200 Ом·м.

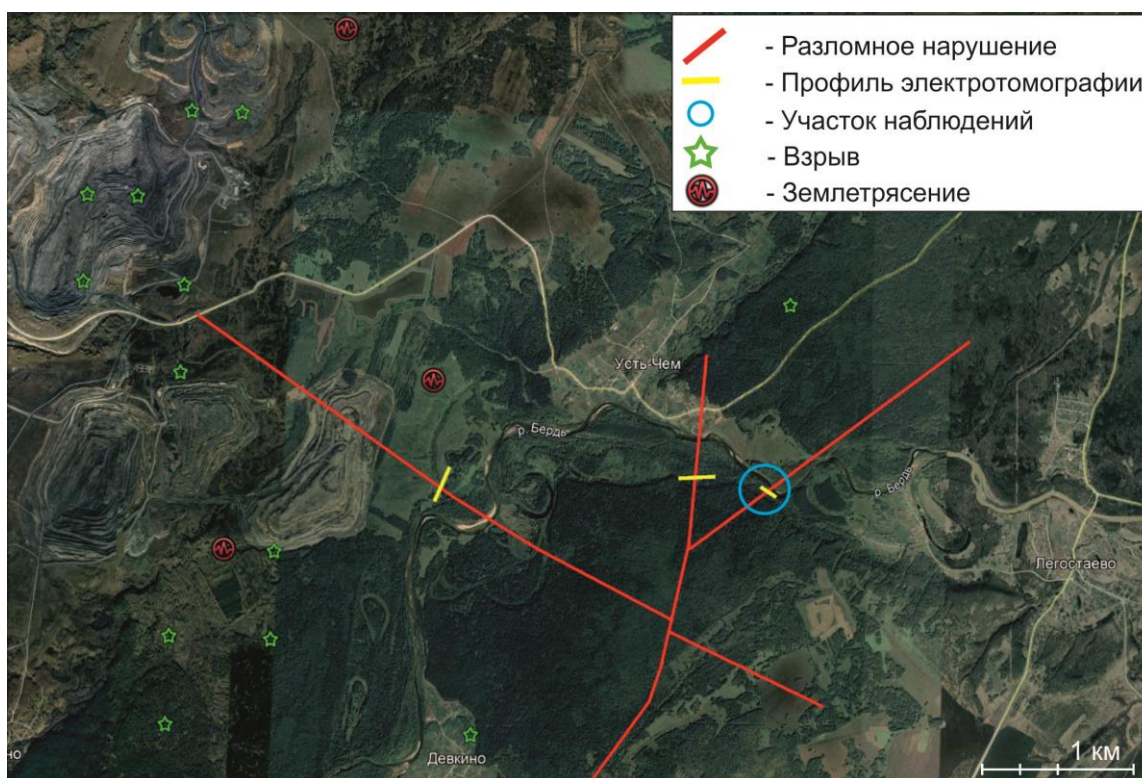


Рис. 2. Схема расположения профиля мониторинга электротомографии и разломные нарушения по геологическим данным

Fig. 2. Layout of the electrical resistivity tomography monitoring profile and fault disturbances according to geological data

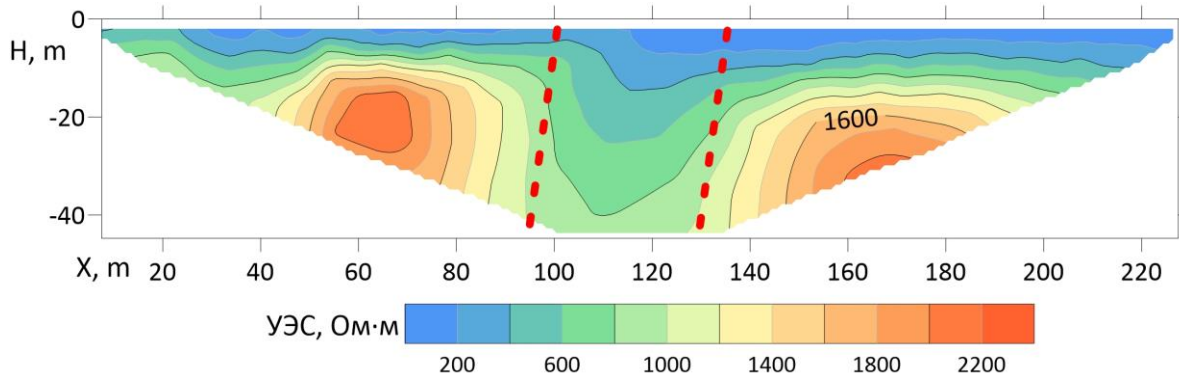


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по профилю мониторинга ЭТ в юго-восточной части Горловской впадины
Fig. 3. Geoelectric section according to the electrical resistivity tomography monitoring profile in the south-eastern part of the Gorlovka depression

Интерпретация полевых данных выполнена с использованием модернизированного программного комплекса моделирования и инверсии данных ЭТ Direct-Inverse-Solver (DiInSo). Этот комплекс, предназначенный ранее для решения прямых 3D и обратных 2D/3D задач ЭТ, был дополнен графом обработки данных мониторинга на основе теоретического анализа разных схем регуляризации. В программе были реализованы два подхода для интерпретации данных мониторинга (\mathbf{d} – вектор данных, \mathbf{m} – искомый вектор, ρ – величины сопротивлений (символ α означает кажущиеся сопротивления), $\mathbf{f}(\mathbf{m})$ – отклик модели, t – временной шаг) [20]:

1) инверсия с исходной моделью \mathbf{m}^0 , заданной как $\mathbf{m}^n - \mathbf{m}^0$ (или альтернативный вариант $\mathbf{m}^n - \mathbf{m}^{n-1}$) [25];

2) так называемая «разностная инверсия после» («difference inversion after») которая дополнительно исправляет несоответствие в t_0 :

$$\mathbf{d}^n = \left\{ \begin{matrix} \rho_\alpha^n \\ \rho_\alpha^0 \end{matrix} \right\} \mathbf{f}(\mathbf{m}^0) \text{ (или } n-1 \text{ вместо } 0) \text{ [26].}$$

На основе решения обратной задачи в программном комплексе DiInSo получено пространственное распределение удельного электрического сопротивления по профилю измерения. На рис. 3 представлен геоэлектрический разрез, полученный при первом измерении методом ЭТ по профилю мониторинга 26 мая 2023 г. На разрезе в центральной части выделяется наклонная низкоомная зона шириной около 30–35 м, которая по своему положению совпадает с разломом, обоснованным геолого-геофизическими данными. Зону с понижением УЭС ограничивают высокоомные отложения с повышением УЭС более чем в 2 раза. Учитывая большое количество теоретического и экспериментального материала (полевые данные, физическое и численное моделирование), полученного ранее авторами [22, 27], эта низкоомная область на геоэлек-

трическом разрезе отнесена к проявлению разломного нарушения. Понижение значений УЭС трещиноватой зоны разломного нарушения обусловлены её повышенной водонасыщенностью, что обосновывается данными гидрогеологии. Присутствует подток в водоносные горизонты трещиноватых зон с юго-восточных соседних областей Салаирского кряжа.

На всех последующих геоэлектрических разрезах отмечаются изменения УЭС как этой низкоомной зоны, так и вмещающих отложений. Полученные вариации УЭС с большой вероятностью связаны с происходящими сейсмическими событиями.

Результаты электромагнитного мониторинга в районе п. Легостаево Искитимского района Новосибирской области

Как было сказано ранее, начиная с 2017 г. по данным сейсмологов в районе Горловского прогиба с интервалом в полгода–год фиксируется по одному и более землетрясений с магнитудой порядка 4. За весь период регулярных наблюдений 2023 г. по профилю мониторинга ЭТ в радиусе 25 км произошло пять землетрясений с магнитудами от 2,1 до 3,7, а также ~20 техногенных взрывов с магнитудами от 2,1 до 3,2. Таким образом, измерения выполнены в период происходящих сейсмических событий, и выявленные вариации УЭС разреза могут быть сопоставлены с воздействием этих сейсмических процессов на геологическую среду.

Всего за время полевых работ осуществлено 11 мониторинговых наблюдений по профилю ЭТ с примерно равными временными интервалами между измерениями. Для анализа данных мониторинга в первую очередь выбраны интервалы, во время которых зарегистрированы наиболее сильные сейсмические события с магнитудами 3,7 и 3,4. По результатам анализа вариаций УЭС выявлена разная реакция геологической среды на землетрясения различной магнитуды. Например, первый

интервал – это измерения 26.05.23 г. и 02.06.23 г., между которыми 28.05.23 г. произошло землетрясение с магнитудой 3,7 на расстоянии 7 км на запад от начала профиля. Второй интервал относится к измерениям 27.06.23 г. и 21.07.23 г., между которыми 04.07.23 г. произошло землетрясение с магнитудой 3,4 на расстоянии 8 км на северо-запад.

За первый временной интервал (26.05.23–02.06.23) реакция геологической среды на сейсмическое событие с магнитудой 3,7 выражается в значительных изменениях УЭС всего полученного геоэлектрического разреза (рис. 4). Наблюдается уменьшение значений УЭС до 40 % в низкоомной разломной зоне и увеличение значений УЭС до 55 % в ограничивающих её высокоомных областях, которые соответствуют коренным породам. Такие вариации УЭС можно объяснить существенным изменением гидрогеологического режима – перераспределением подземных вод под воздействием

происходящих сейсмических событий, которые влияют на напряженное состояние среды.

Для второго временного интервала (27.06.23–21.07.23) также выявлена реакция на сейсмическое событие с магнитудой 3,4, но при этом характер изменения УЭС среды и величина вариаций отличается от первого случая (рис. 5). Полученные вариации УЭС находятся в диапазоне от –15 до +10 %, и изменение знака вариаций происходит непосредственно по разломной зоне. Такие различия в вариациях могут быть связаны с разными направлениями на эпицентры событий по отношению к профилю измерений и различиями в магнитудах. Кроме того, возможны разные механизмы, глубины до гипоцентра происходящих землетрясений. Однако на данный момент отсутствует опубликованная информация о некоторых параметрах этих землетрясений.

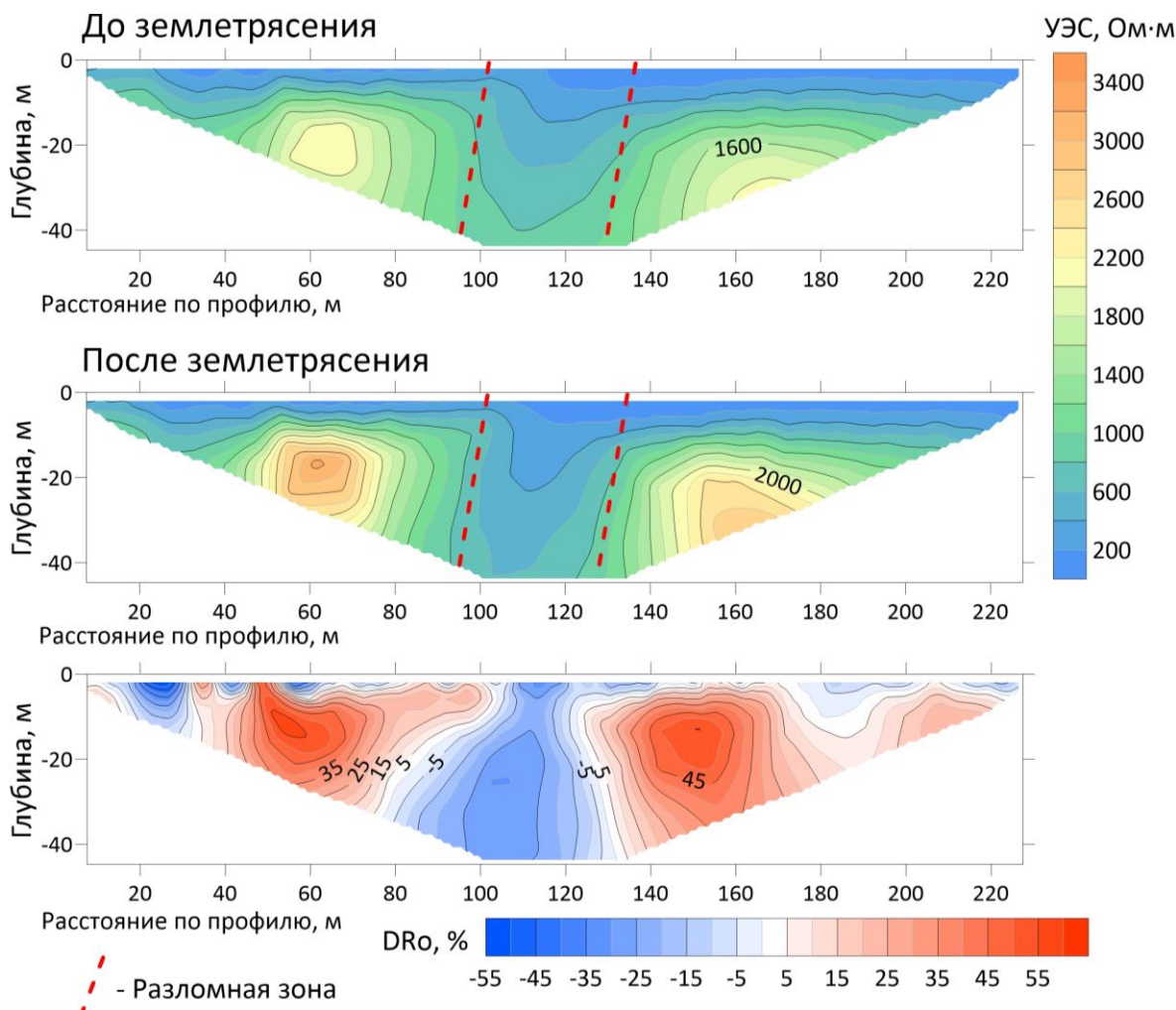


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы по профилю мониторинга (26.05.23 г. и 02.06.23 г.) и относительные изменения УЭС по разрезу в процентах

Fig. 4. Geoelectric sections of the monitoring profile data (26.05.23 and 02.06.23) and relative changes in resistivity along the section in percent

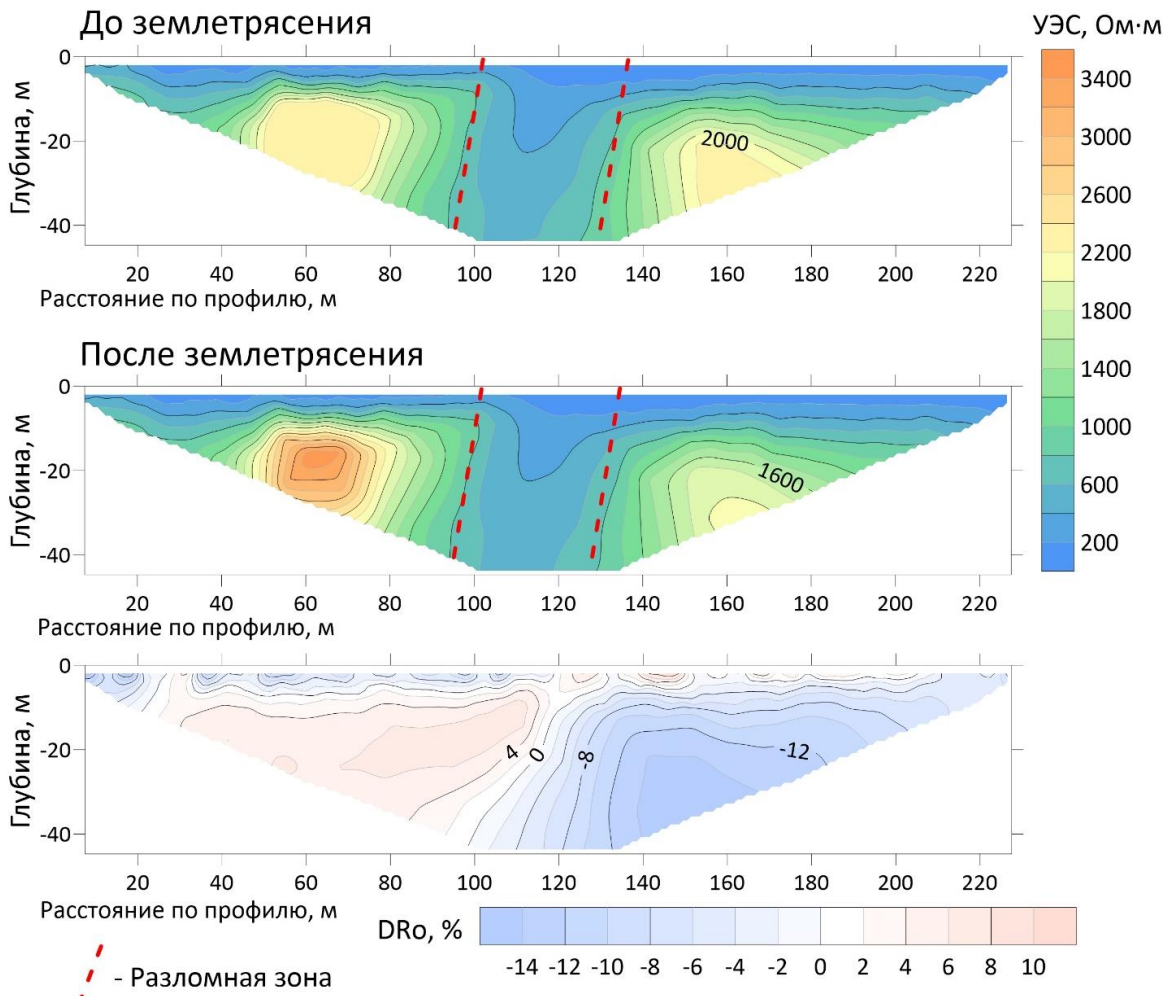


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы по профилю мониторинга (27.06.23 г. и 21.07.23 г.) и относительные изменения УЭС по разрезу

Fig. 5. Geoelectric sections of the monitoring profile data (27.06.23 and 21.07.23) and relative changes in resistivity along the section in percent

Заключение

В статье представлены первые результаты регулярных наблюдений методом электротомографии по профилю, пересекающему разломную зону, на участке исследования в Горловском прогибе, полученные при интерпретации полевых данных с помощью модернизированного программного комплекса DiInSo. За весь период наблюдений отмечено два крупных землетрясения, реакция на которые проявилась в значимых изменениях УЭС геоэлектрического разреза, вариации УЭС достигают 40–50 %. Необходимо отметить, что после событий поразному изменяются значения УЭС как в выявленной разломной зоне, так и во вмещающих эту зону отложениях. Выявленные корреляции основаны на совместном анализе результатов интерпретации всего объема регулярных наблюдений с интервалом между измерениями в среднем 2 недели, выполненных с мая по ноябрь 2023 г., с параметрами текущей сейсмичности.

Кроме того, показано, что на величину вариаций влияет магнитуда землетрясения: чем больше магнитуда землетрясения, тем больше величина вариаций УЭС. Предварительно можно отметить, что выявленные вариации геоэлектрических параметров отражают реакцию геологической среды не только на происходящие за период наблюдений землетрясения, но и на техногенные воздействия (взрывы), причем эта реакция позволяет отличить взрывы от землетрясений. Полученные результаты в очередной раз подтверждают выводы предшествующих исследований о высокой чувствительности электромагнитного поля к изменению сейсмического режима.

Конечно, пока недостаточно данных для окончательных выводов о возможностях электромагнитных методов в конкретных геоэлектрических условиях участка исследования, любой мониторинг предполагает длительные наблюдения для выявления закономерностей и критериев сейсмических

активизаций. В связи с этим планируется продолжение регулярных наблюдений методом электро-томографии в Горловской впадине в полевом сезоне 2024 г., а также будет продолжена работа с

программными средствами DiInSo для более полноценной количественной оценки вариаций УЭС и наглядного представления результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геодинамические комплексы и этапы развития Колывань-Томской складчатой зоны (Западная Сибирь) / Л.В. Кунгурцев, Г.С. Федосеев, В.А. Широких, А.А. Оболенский, В.И. Сотников, А.С. Борисенко, В.О. Гимон // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39. – № 1. – С. 26–37.
2. Геодинамика, магматизм, и металлогения Колывань-Томской складчатой зоны / О.П. Иванов, 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 ОИГТМ, 1999. – 227 с.
3. Колыванское землетрясение 09.01.2019 г. с $M_L=4.3$ и особенности наведенной сейсмичности в условиях Горловского угольного бассейна / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, О.В. Павленко, А.В. Фатеев, О.В. Куприш, В.Г. Подкорытова // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2019. – Т. 4. – № 46. – С. 29–45. DOI: <https://doi.org/10.21455/VIS2019.4-2>
4. Техногенная сейсмическая активизация в районе Горловского угольного бассейна / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев, Е.В. Шевкунова, Е.А. Гладышев // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 207–210. DOI: [10.15372/FPVGN2021080132](https://doi.org/10.15372/FPVGN2021080132)
5. Наведенная сейсмичность в Горловском угольном бассейне. Колыванское землетрясение в структуре техногенной активизации / Е.В. Шевкунова, А.А. Еманов, А.Ф. Еманов, И.А. Антонов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XV Международной сейсмологической школы. – Новосибирск, 6–10 сентября 2021. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 106.
6. Электромагнитные исследования современных геодинамических процессов литосферы областей внутриконтинентальной орогении, на примере Тянь-Шаня / А.К. Рыбин, Е.А. Баталева, П.Н. Александров, К.С. Непейна // Физика Земли. – 2022. – Т. 68. – № 5. – С. 98–115. DOI: [10.31857/S0002333722050234](https://doi.org/10.31857/S0002333722050234)
7. Сидорин А.Я. Выдающееся достижение Российской академии наук: успешный прогноз землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. // Геофизические процессы и биосфера. – 2011. – Т. 10. – № 1. – С. 5.
8. Du X.B. Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction // Science China Earth Sciences. – 2011. – Vol. 54. – Iss. 1. – P. 145–156. DOI: [10.1007/s11430-010-4031-y](https://doi.org/10.1007/s11430-010-4031-y).
9. Changes in apparent resistivity in the late preparation stages of strong earthquakes in earthquake / X.B. Du, Z. An, R. Yan, Q. Ye, Y. Fan et al. // Research and Analysis in Statistical Studies, Observations and Planning / Ed. by Dr S. D'Amico. – 2012. – P. 199–220. DOI: [10.5772/27597](https://doi.org/10.5772/27597)
10. Stochastic analysis of geo-electric field singularities as seismically correlated candidates / A. Konstantaras, G.N. Fouskitakis, J.P. Makris, F. Vallianatos // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2008. – № 8. – P.1451–1462. DOI: [10.5194/nhess-8-1451-2008](https://doi.org/10.5194/nhess-8-1451-2008).
11. Zhao Y.L. Goelectric precursors to strong earthquakes in China // Tectonophysics. – 1994. – Vol. 233. – № 1, 2. – P. 99–113.
12. Ma Li, Ghen J., Chen Q. Features of precursor field before and after Datong Yangao earthquake swarm // J. Earth. Pred. Res. – 1995. – Vol. 4. – № 1. – P. 71–76.
13. A possible reason for the anisotropic changes in apparent resistivity near the focal region of strong earthquake / X.-B. Du, N. Li, Q. Ye, Z.-H. Ma, R. Yan // Chinese Journal of Geophysics. – 2007. – Vol. 50. – № 6. – P. 1555–1565.
14. Analysis on apparent resistivity variations of Garzê Station before the 2013 Lushan MS7 earthquake / T. Xie, J. Lu, Y. Ren, M. Zhao // Earthquake research in China. – 2014. – № 3. – P. 388–402.
15. Lapenna V., Perrone A. Time-lapse electrical resistivity tomography (TL-ERT) for landslide monitoring: recent advances and future directions // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – № 3. – P. 1425. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031425>
16. Singh U., Sharma P. K. Seasonal groundwater monitoring using surface NMR and 2D/3D ERT // Environmental Earth Sciences. – 2022. – Vol. 81. – № 7. – P. 198. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10325-9>
17. Imaging of fault and fracture controls in the Arbuckle-Simpson aquifer, Southern Oklahoma, USA, through electrical resistivity sounding and tomography methods / K. Ramachandran, B. Tapp, T. Rigsby, E. Lewallen // International Journal of Geophysics. – 2012. – P. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/184836>.
18. Первые результаты исследований Горловской впадины наземными методами электроразведки с контролируемыми источниками / А.М. Санчаа, Н.Н. Неведрова, С.М. Бабушкин, И.О. Шапаренко, А.Е. Шалагинов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: Материалы XVII международной научной конференции. – Новосибирск, 19–21 мая 2021. – Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2021. – Т. 2. – № 2. – С. 272–279.
19. Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М. Геоэлектрическое строение разломного ограничения Горловского прогиба Новосибирской области по данным нестационарных электромагнитных зондирований // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Интерэкспо ГЕО-Сибирь – XIX Международный научный конгресс. Международная научная конференция: Сборник материалов в 8 т. – Новосибирск, 17–19 мая 2023. – Новосибирск: СГУГиТ, 2023. – Т. 2. – № 4. – С. 61–67.
20. Развитие программно-алгоритмических средств для обработки и интерпретации данных мониторинга методом электротомографии / Н.Н. Неведрова, А.Е. Шалагинов, А.В. Мариненко, И.О. Шапаренко // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2023. – Т. 21. – № 3. – С. 32–45. DOI: [10.25205/1818-7900-2023-21-3-32-45](https://doi.org/10.25205/1818-7900-2023-21-3-32-45)
21. Шапаренко И.О., Неведрова Н.Н. Применение метода электротомографии для исследования разломных структур (на примере Горного Алтая) // Геосочи-2022. Современное состояние и перспективы развития инженерной геофизики: Материалы международной научно-практической конференции. – Сочи, 27–29 апреля 2022. – С. 14–17.

22. Kolyvan earthquake of January 9, 2019, with $M_L=4/3$ and induced seismicity features of the Gorlovsky coal basin / A.F. Emanov, A.A. Emanov, O.V. Pavlenko, A.V. Fateev, O.V. Kuprish, V.G. Podkorytova // *Seismic Instruments*. – 2020. – Vol. 56. – № 3. – P. 254–268. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0747923920030020>.
23. Геологическая карта: N-44-XVIII (Черепаново). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Издание второе. Кузбасская серия, масштаб: 1:200000, серия: Кузбасская / под ред. Л.С. Ратанова. – М.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2014. – 200 с.
24. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации / А.А. Бобачев, А.А. Горбунов, И.Н. Модин, В.А. Шевнин // *Приборы и системы разведочной геофизики*. – 2006. – Т. 2. – С. 14–17.
25. Schutze C., Friedel S., Jacobs F. Detection of three-dimensional transport processes in porous aquifers using geoelectrical quotient tomography // *European Journal of Environment and Engineering Geophysics*. – 2022. – № 7. – P. 3–19.
26. Labrecque D.J., Yang X. Difference inversion of ERT Data: a fast inversion method for 3-D in situ monitoring // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2001. – № 6. – P. 83. DOI: <https://doi.org/10.4133/JEEG6.2.83>.
27. Шапаренко И.О., Неведрова Н.Н., Карин Ю.Г. Физическое моделирование разломных зон сейсмоактивных районов по данным электротомографии // *Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Интерэкспо ГЕО-Сибирь – XIX Международный научный конгресс. Международная научная конференция: Сборник материалов в 8 т. – Новосибирск, 17–19 мая 2023. – Новосибирск: СГУГиТ, 2023. – Т. 2. – № 4. – С. 68–72.*

Информация об авторах

Александр Евгеньевич Шалагинов, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3556-731X>

Нина Николаевна Неведрова, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3210-5248>

Илья Олегович Шапаренко, младший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; ShararenkoIO@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5460-6505>

Аркадий Вадимович Мариненко, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; MarinenkoAV@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию: 20.12.2023

Поступила после рецензирования: 22.01.2024

Принята к публикации: 27.09.2024

REFERENCES

1. Kungurtsev L.V., Fedoseev G.S., Shirokikh V.A., Obolenskiy A.A., Sotnikov V.I., Borisenko A.S., Gimov V.O. Geodynamic complexes and stages of development of Kolyvan-Tomsk fold zone (Western Siberia). *Geologija i geofizika*, 1998, vol. 39, no. 1, pp. 26–37. (In Russ.)
2. Ivanov O.P., Sotnikov V.I., Fedoseev G.S., Kungurtsev L.V., Borisenko A.S., Obolenskiy A.A., Vasilev I.P., Gimov V.O. *Geodynamics, magmatism, and metallogeny of the Kolyvan-Tomsk fold zone*. Novosibirsk, SB RAS Publ. house, NIC OIGGM, 1999. 227 p. (In Russ.)
3. Emanov A.F., Emanov A.A., Pavlenko O.V., Fateev A.V., Kuprish O.V., Podkorytova V.G. Kolyvan earthquake of 01/09/2019 with $M_L=4.3$ and features of induced seismicity in the Gorlovka coal basin. *Voprosy inzhenernoy seysmologii*, 2019, vol. 4, no. 46, pp. 29–45. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21455/VIS2019.4-2>
4. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V., Gladyshev E.A. Technogenic seismic activation in the Gorlovka coal basin. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, 2021, vol. 8, no 1, pp. 207–210. (In Russ.) DOI: 10.15372/FPVGN2021080132
5. Shevkunova E.V., Emanov A.A., Emanov A.F., Antonov I.A. Induced seismicity in the Gorlovka coal basin. Kolyvan earthquake in the structure of technogenic activation. *Modern techniques of processing and interpreting seismic data. Proc. of the XV International seismic school*. Novosibirsk, September 6–10, 2021. Obninsk, FIC EGS RAN Publ., 2021. pp. 106. (In Russ.)
6. Rybin A.K., Bataleva E.A., Aleksandrov P.N., Nepeina K.S. Electromagnetic studies of modern geodynamic processes in the lithosphere of areas of intracontinental orogeny, using the example of the Tien Shan region. *Fizika Zemli*, 2022, vol. 68, no. 5, pp. 98–115. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0002333722050234
7. Sidorin A.Ya. Outstanding achievement of the Russian Academy of Sciences: successful forecast of the earthquake in Japan on March 11, 2011. *Geofizicheskie protsessy i biosfera*, 2011, vol. 10, no. 1, p. 5. (In Russ.)
8. Du X. B. Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction. *Science China Earth Sciences*, 2011, vol. 54, Iss. 1, pp. 145–156. DOI: 10.1007/s11430-010-4031-y.
9. Du X.B., An Z., Yan R., Ye Q., Fan Y. Changes in apparent resistivity in the late preparation stages of strong earthquakes in earthquake. *Research and Analysis in Statistical Studies, Observations and Planning*. Ed. by Dr S. D'Amico. 2012, pp. 199–220. DOI: 10.5772/27597

10. Konstantaras A., Fouskitakis G.N., Makris J.P., Vallianatos F. Stochastic analysis of geo-electric field singularities as seismically correlated candidates. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2008, no. 8, pp. 1451–1462 DOI: 10.5194/nhess-8-1451-200.
11. Zhao Y.L. Goelectric precursors to strong earthquakes in China. *Tectonophysics*, 1994, vol. 233, no. 1, 2, pp. 99–113.
12. Ma Li, Ghen J., Chen Q. Features of precursor field before and after Datong Yangao earthquake swarm. *J. Earth. Pred. Res.*, 1995, vol. 4, no. 1, pp. 71–76.
13. Du X.-B., Li N., Ye Q., Ma Z.-H., Yan R. A possible reason for the anisotropic changes in apparent resistivity near the focal region of strong earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, vol. 50, no. 6, pp. 1555–1565.
14. Xie T., Lu J., Ren Y., Zhao M. Analysis on apparent resistivity variations of Garzê Station before the 2013 Lushan MS7 earthquake. *Earthquake research in China*, 2014, no. 3, pp. 388–402.
15. Lapenna V., Perrone A. Time-lapse electrical resistivity tomography (TL-ERT) for landslide monitoring: recent advances and future directions. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 3, p. 1425. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031425>
16. Singh U., Sharma P. K. Seasonal groundwater monitoring using surface NMR and 2D/3D ERT. *Environmental Earth Sciences*, 2022, vol. 81, no. 7, p. 198. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10325-9>
17. Ramachandran K., Tapp B., Rigsby T., Lewallen E. Imaging of fault and fracture controls in the Arbuckle-Simpson aquifer, Southern Oklahoma, USA, through electrical resistivity sounding and tomography methods. *International Journal of Geophysics*, 2012, pp. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/184836>.
18. Sanchaa A.M., Nevedrova N.N., Babushkin S.M., Shaparenko I.O., Shalaginov A.E. The first results of studies of the Gorlovka depression using ground-based electrical prospecting methods with controlled sources. *Interjeksno GEO-Sibir. Subsoil use. Mining. Directions and techniques for searching, development and exploration of mineral deposits. Economics. Geoecology. Proc. XVII International scientific conference.* Novosibirsk, May 19–21, 2021. Novosibirsk, IPGG SB RAS Publ. house, 2021. Vol. 2, no. 2, pp. 272–279. (In Russ.)
19. Shalaginov A.E., Nevedrova N.N., Babushkin S.M. Goelectric structure of the fault boundary of the Gorlovsky trough of the Novosibirsk region according to non-stationary electromagnetic sounding data. *Interjeksno GEO-Sibir. XIX International scientific congress. International scientific conference. Subsoil use. Mining. Directions and techniques for searching, development and exploration of mineral deposits. Economics. Geoecology.* Novosibirsk, May 17–19, 2023. Novosibirsk, SGUGiT Publ. house, 2023. Vol. 2, no. 4, pp. 61–67. (In Russ.)
20. Nevedrova N.N., Shalaginov A.E., Marinenko A.V., Shaparenko I.O. Development of software and algorithmic tools for processing and interpreting monitoring data using electrical tomography. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii*, 2023, vol. 21, no. 3, pp. 32–45. (In Russ.) DOI: 10.25205/1818-7900-2023-21-3-32-45
21. Shaparenko I.O., Nevedrova N.N. Application of the electrical tomography method to study fault structures (using the example of Gorny Altay region). *Geosochi-2022. Modern state and prospects of development of engineering geophysics. Proc. International scientific and practical conference.* Sochi, April 27–29, 2022. pp. 14–17. (In Russ.)
22. Emanov A.F., Emanov A.A., Pavlenko O.V., Fateev A.V., Kuprish O.V., Podkorytova V.G. Kolyvan Earthquake of January 9, 2019, with $ML=4/3$ and induced seismicity features of the Gorlovsky coal basin. *Seismic Instruments*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 254–268. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0747923920030020>.
23. *Geological map: N-44-XVIII (Cherepanovo). State geological map of the Russian Federation. 2nd ed. Kuzbass series, scale: 1:200000.* Ed. by L.S. Ratanov. Moscow, FGBU «VSEGEI» Publ. house, 2014. 200 p. (In Russ.)
24. Bobachev A.A., Gorbunov A.A., Modin I.N., Shevnin V.A. Electrical resistivity tomography using the method of resistance and induced polarization. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki*, 2006, vol. 2, pp. 14–17. (In Russ.)
25. Schutze C., Friedel S., Jacobs F. Detection of three-dimensional transport processes in porous aquifers using geoelectrical quotient tomography. *European Journal of Environment and Engineering Geophysics*, 2022, no. 7, pp. 3–19.
26. Labrecque D.J., Yang X. Difference inversion of ERT data: a fast inversion method for 3-D in situ monitoring. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2001, no. 6, p. 83. DOI: <https://doi.org/10.4133/JEEG6.2.83>.
27. Shaparenko I.O., Nevedrova N.N., Karin Yu.G. Physical modeling of fault zones in seismically active areas based on electrical tomography data. *Interjeksno GEO-Sibir. XIX International scientific congress. International scientific conference. Subsoil use. Mining. Directions and techniques for searching, development and exploration of mineral deposits. Economics. Geoecology.* Novosibirsk, May 17–19, 2023. Novosibirsk, SGUGiT Publ. house, 2023. Vol. 2, no. 4, pp. 68–72. (In Russ.)

Information about the authors

Aleksandr E. Shalaginov, Cand. Sc., Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3556-731X>

Nina N. Nevedrova, Dr. Sc., Chief Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3210-5248>

Ilya O. Shaparenko, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; ShaparenkoIO@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5460-6505>

Arkadii V. Marinenko, Cand. Sc., Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; MarinenkoAV@ipgg.sbras.ru

Received: 20.12.2023

Revised: 22.01.2024

Accepted: 27.09.2024