

СТРОЕНИЕ И МОНИТОРИНГ В ЗОНЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ ГОРЛОВСКОЙ ВПАДИНЫ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

Н. Н. Неведрова¹ , А. Е. Шалагинов^{1,*} , И. О. Шапаренко¹ ,
А. М. Санчаа¹ , и А. В. Мариненко¹ 

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия
* **Контакт:** Александр Евгеньевич Шалагинов, shalaginovae@ipgg.sbras.ru

В последнее десятилетие существенно выросла интенсивность разработки Горловского угольного месторождения, что приводит к формированию сейсмической активизации недр Горловской впадины в ответ на техногенное воздействие. Начиная с 2019 года, в районе месторождения фиксируются землетрясения с магнитудой более 4, ощутимые в г. Новосибирске и его пригородах. Основная цель исследования: по мере накопления данных выявить критерии сейсмических активизаций с использованием одного из методов наземной электроразведки – электротомографии. В статье рассмотрено геоэлектрическое строение Горловской впадины в области перехода от её отложений к Салаирскому кряжу, а также проанализированы результаты мониторинга, выполненного в 2023 г. методом электротомографии по профилю, пересекающему одну из разломных структур. Профиль мониторинговых наблюдений находится на участке, выбранном в ходе опытно-методических работ и расположен всего в нескольких километрах от угледобывающих карьеров и зоны концентрации сейсмических событий. Получено, что выявленные вариации геоэлектрических параметров отражают реакцию геологической среды не только на происходящие за период наблюдений землетрясения, но и на техногенные воздействия (взрывы).

Ключевые слова: Горловская впадина, природно-техногенная сейсмичность, геофизический мониторинг, электротомография, вариации электропроводности, методика измерений, программные средства, инверсия.

Цитирование: Неведрова, Н. Н., А. Е. Шалагинов, И. О. Шапаренко, А. М. Санчаа, и А. В. Мариненко Строение и мониторинг в зоне сейсмической активизации Горловской впадины Алтае-Саянской складчатой области по данным электротомографии // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES5003. — DOI: 10.2205/2024es000947 — EDN: JTUSOL

Введение

Масштабы промышленного развития цивилизации нарушают природное равновесие, и нагрузка на окружающую экосистему все время увеличивается. По ряду причин воздействие человека на среду его обитания существенно возросло в последние десятилетия и это связано, в том числе, с большими объемами добычи полезных ископаемых. Интенсивная разработка месторождений по ряду современных представлений может привести к усилению сейсмической активности соответствующих территорий и возможным катастрофическим последствиям. В настоящее время задачи поддержания экологического равновесия и пути их решения относятся к наиболее актуальным и приоритетным.

На территории России регулярно регистрируются природно-техногенные сейсмические события в ранее асейсмичных регионах, при этом в основном их магнитуды не превышают 2–3, и соответственно, такие землетрясения локально воздействуют

<https://elibrary.ru/jtusol>

Получено: 21 августа 2024 г.
Принято: 25 октября 2024 г.
Опубликовано: 13 ноября 2024 г.



© 2024. Коллектив авторов.

на окружающую среду. Вместе с тем, имеются регионы, в которых сейсмичность, связанная с техногенными воздействиями, представляет реальную угрозу. Ярким примером является Бачатское землетрясение 2013 г. с магнитудой $M_L = 6,1$ в районе длительно разрабатываемых угольных месторождений Кузбасса. Это событие стало крупнейшим землетрясением при разработке твердых полезных ископаемых, инициированным техногенной нагрузкой на среду. Оно вызвало масштабные разрушения жилой инфраструктуры в целом ряде поселков. В Горловском угольном бассейне Новосибирской области в 2019 г. произошло Колыванское землетрясение с магнитудой $M_L = 4,3$, и далее сейсмичность территории бассейна продолжает усиливаться. Малые магнитуды приповерхностных техногенных землетрясений компенсируются близостью очагов к поверхности и могут вызвать локальные катастрофы для населения. Землетрясения с магнитудой более 4 могут привести к заметным повреждениям зданий, промышленных сооружений, коммуникаций [Еманов и др., 2019].

Причины возникновения техногенной сейсмичности связаны с изменениями порового или пластового давления, перераспределением напряжений в горном массиве при извлечении больших объемов пород и созданием подработанных пространств. Чаще всего эти причины взаимосвязаны и зависят от особенностей воздействия на среду, тектонической обстановки, геологического строения [Адушкин и Турунтаев, 2015; Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Книга 2. Макросейсмичность, 2007].

В Западной Сибири техногенная сейсмичность наиболее сильно проявляется не только в Кузбассе и Горловском бассейне при добыче угля в шахтах или открытым способом [Еманов и др., 2021], но и в Горной Шории в районе разработки железных руд шахтным способом [Еманов и др., 2020a,b], на нефтяных месторождениях Томской области.

В данной работе объектом исследования является Горловская впадина. Техногенная сейсмичность в этой впадине активно развивается на территории крупных добывающих угольных карьеров, которые находится примерно в 60 км от г. Новосибирска и в 20 км от научного центра «Академгородок», а сама впадина вместе с окружающими её складчатыми структурами расположена на юго-западе Алтае-Саянской горной области. Уникальные месторождения антрацита разведаны на её территории в прошлом столетии. Их промышленное освоение начато еще в 1930 г. открытым способом и далее в 1980–1990 г. месторождения разрабатываются как в шахтах (Листвянское), так и на разрезах (Горловское, Ургунское).

В настоящее время продолжают буровзрывные работы, связанные с разработками Колыванского (Северный, Крутихинский, Восточный участки), Ургунского и Горловского месторождений. В ближайшем будущем готовится открытие нового разреза «Богатырь», площадь которого составит более 300 квадратных километров, что, судя по прецедентам, будет влиять на дальнейшее развитие сейсмичности с вероятностью землетрясений более высоких магнитуд. Постоянное увеличение сейсмической активности потенциально опасно для населения и жилой, научной, промышленной инфраструктуры. Так, на расстоянии менее 100 км от участков концентрации сейсмических событий ведется строительство синхротрона «СКИФ», первого в мире источника фотонов поколения 4+. Очевидно, что долгосрочное интенсивное воздействие техногенных источников неминуемо приводит к изменениям природных геодинамических и гидрогеологических режимов, существующих в земной коре, доказано влияющих на геофизические и в том числе электромагнитные поля.

Начиная с 2020 г. сотрудниками лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН выполняются комплексные исследования методами наземной электроразведки по изучению строения Горловского прогиба с целью получения геоэлектрических характеристик отложений осадочного выполнения, выявления разломных структур [Санчаа и др., 2021; Шалагинов и др., 2023]. Регулярные наблюдения с помощью методов электроразведки начали проводиться в 2023 г. и продолжают в настоящее время непосредственно в зоне сейсмической активизации Горловского бассейна. Они дают воз-

возможность проследить периоды подготовки и реализации происходящих землетрясений. Основная цель исследования: по мере накопления данных выявить критерии сейсмических активизаций с использованием одного из методов наземной электроразведки – электротомографии. К одной из задач относится разделение влияния взрывных работ в угледобывающем карьере от регулярно происходящих землетрясений, зафиксированных сейсмологами.

Геолого-геофизические и сейсмологические данные

Площадь работ находится в зоне сопряжения южной окраины Западно-Сибирской плиты и её горно-складчатого обрамления – Алтае-Саянской складчатой области. Горловская впадина расположена между крупными тектоническими структурами – северо-западными отрогами Салаирского кряжа и Томь-Колыванской складчатой зоной, от обрамляющих горных структур она отделена региональными разломами. Эта глубокая и узкая грабен-синклиналь шириной всего 12–15 км протягивается на 120 км с юго-запада на северо-восток и характеризуется развитием интенсивной линейной складчатости, напряженной тектоники. Локальные узкие складки, вытянутые вдоль простирания впадины, осложнены складчатостью более мелких порядков и локальными разломами. Со стороны Салаирского кряжа Горловскую впадину на разных участках ограничивает система региональных дизъюнктивов, включающая Чемской, Доронинский и Кемеровский разломы. Менее значительные разрывные нарушения отделяют впадину от Колывань-Томской структурной зоны. [Кишкина и др., 2021]. В целом равнинный рельеф осложнен речной сетью с глубоко врезаемыми речными долинами, логами с крутыми склонами и глубиной вреза от 60 до 90 м. Участки, примыкающие к Салаирскому кряжу, характеризуются ещё более расчлененным рельефом с мелкими сопками, оврагами, обрывами и заболоченными территориями [Котельников и др., 2015]. Это осложняет проведение геофизических работ.

Выбранный для мониторинга сейсмоактивный участок, расположенный в районе поселков Девкино, Легостаево и Усть-Чём Искитимского района Новосибирской области, включает восточную разломную границу впадины с Салаирским кряжем, поэтому важны сведения о Чемском разломе, именно он на этом участке отделяет комплексы среднего-позднего палеозоя Горловского прогиба от раннепалеозойских отложений Салаира. На отдельных своих фрагментах разлом хорошо выражен в гравитационном поле, ему соответствует градиентная зона, разделяющая область отрицательной аномалии над Горловским прогибом от региональной положительной аномалии над Салаиром. Система более мелких разрывных нарушений в орогенный этап развития Колывань-Томской структурной зоны образовалась в обстановке сжатия и формировались надвиговые структуры, в результате чего отложения Горловского прогиба были надвинуты на структуры Салаира. Поверхности сместителей имеют северо-западное падение [Сотников и др., 1999].

В верхнем палеозое на территории прогиба располагался мелководный бассейн и отложилось большое количество органогенных осадочных пород (известняки, мрамор, каменный уголь). Впадина заполнена карбонатно-терригенными отложениями карбона и перми. В верхней части разреза преобладает угленосная моласса карбон-раннепермского возрастов. Средняя и нижняя части представлены континентальными и морскими отложениями соответственно. Метаморфизм пермских углей достигает антрацитово-стадии, и в Горловском угольном бассейне сосредоточены самые значительные запасы антрацита в России [Котельников и др., 2015].

Поскольку в Горловском прогибе начаты регулярные наблюдения методом электроразведки, для их интерпретации используется авторский подход, основанный на знании геоэлектрического строения участка исследования и анализе пространственно-временных вариаций параметров геоэлектрических моделей при изменениях сейсмической активности. Модели получают в результате инверсии полевых данных. Для выбора оптимальных участков мониторинга важны сведения о размещении разломных нарушений и их геоэлектрических характеристиках. Строение впадины как глубинное,

так и приповерхностное ранее было изучено недостаточно, отсутствовали современные геофизические данные. Поэтому начиная с 2020 года, сотрудниками лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН проводятся измерения комплексом методов наземной электроразведки с целью уточнения геоэлектрического строения отложений осадочного выполнения Горловского прогиба, в том числе в зонах перехода к Салаирскому кряжу. Схема размещения пунктов и профилей представлена на рис. 1. В комплекс входят методы постоянного и переменного тока: зондирование становлением поля (ЗСП), вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), электротомография (ЭТ).

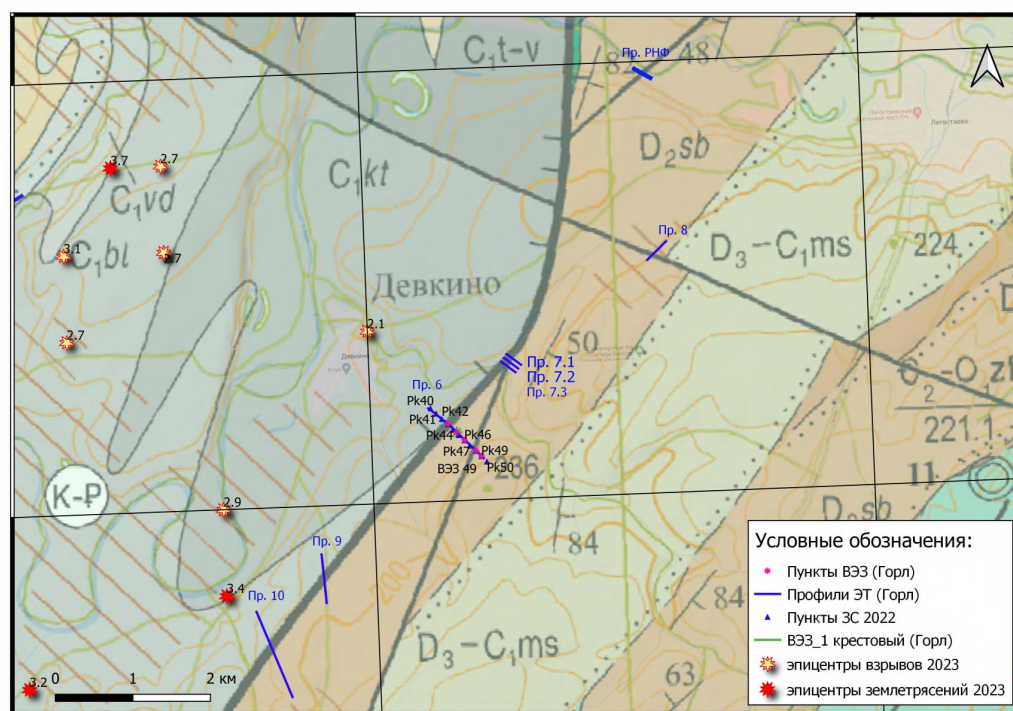


Рис. 1. Схема наблюдений методами наземной электроразведки в Горловской впадине на подложке геологической карты N-44-XVIII (Черепаново), (<http://mfvsegei.ru/>).

В качестве примера рассмотрим характеристики разреза по данным ЗСП и ВЭЗ по профилю 6, пересекающему Чемской и второстепенный разломы вкрест простирания впадины. Разрез отражает глубинное строение отложений Горловской впадины и разломных структур, её ограничивающих в зоне сейсмической активизации. Оба разлома на разрезе по профилю 6 выделяются общей областью понижения значений удельного электрического сопротивления (УЭС), относительно вмещающих горных пород, и на глубине 200 м её ширина составляет ~ 250 м. Структурные особенности разломной зоны следующие – почти вертикальная северо-западная граница и наклонная юго-восточная.

Метод электротомографии далее используется для регулярных наблюдений, поэтому его результаты по изучению строения наиболее актуальны. Измерения ЭТ были выполнены на локальных участках в зонах перехода от отложений Горловского прогиба к Салаирскому кряжу по профилям 7, 8, 9, 10 для построения геоэлектрических моделей верхней части разреза. Из-за особенностей местности профили ЭТ имеют разную длину. Измерения по профилям 7, 8 выполнены с использованием современной многоэлектродной электроразведочной аппаратуры «Скала 48» с установкой Шлюмберже и шагом между электродами в 5 м. Для профилей 9, 10 использована «Скала 64k15E», шаг по профилю составил 10 м (<https://nemfis.ru/siber-64k15>). Все профили ЭТ проложены через разломные нарушения юго-восточного борта впадины как в зоне Чемского разлома, так и в области его пересечения с второстепенными дизъюнктивами. Разрезы электротомографии в зависимости от выбранной установки построены до глубин от 40 до 100 м. В результате совместного анализа полученных геоэлектрических разрезов

и геологических данных было выяснено, что Чемской разлом отражается понижением УЭС не на всех разрезах ЭТ. Это может быть связано с повышенной активностью только его отдельных фрагментов. Кроме того, учитывая его большую протяженность, линия разлома по геологическим данным возможно проведена не совсем верно, что можно будет уточнить с помощью дополнительных измерений электротомографии. Тем не менее, на разрезе по профилю 7, который проходит в месте сочленения Чемского и второстепенного разломов в его северо-западной части выделяется зона со значениями удельного электрического сопротивления (УЭС), которые на порядок ниже УЭС ограничивающих её высокоомных горных пород Салаира – D2 sb (рис. 2). К сожалению, продлить профиль 7 далее на северо-запад нет возможности из-за присутствия крутого заболоченного оврага, поэтому определить полную ширину разлома в этом месте невозможно. Вместе с тем, юго-восточное ограничение разломной зоны данным ЭТ наклонное, что совпадает с геологическими данными и результатами ЗСБ и ВЭЗ по профилю 6. По результатам совместного анализа полученных геоэлектрических разрезов, геологических и сейсмологических данных сделан вывод, что Чемской разлом выделяется понижением УЭС относительно вмещающих пород только на его отдельных фрагментах, что может быть связано в том числе с направленным локальным воздействием происходящих сейсмических процессов.

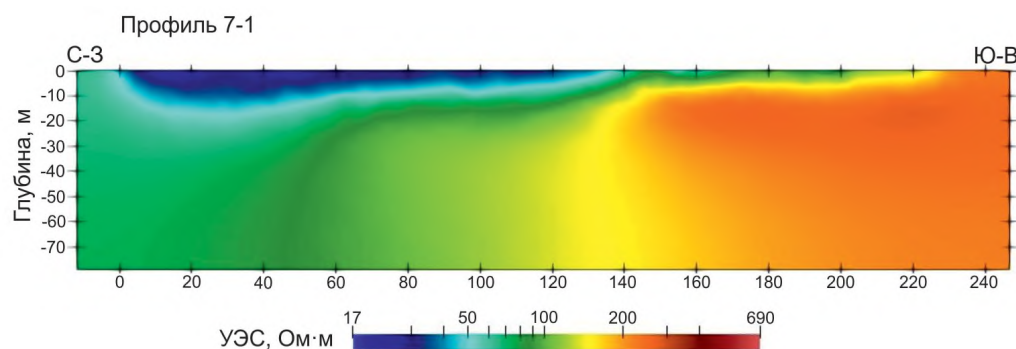


Рис. 2. Разрез по данным электротомографии по профилю 7 через Чемской разлом по данным электротомографии.

Выбор участков для профилей в Горловской впадине обусловлен опытом многолетних мониторинговых наблюдений в Байкальской рифтовой зоне и Горном Алтае, где самая сильная реакция электромагнитных методов на усиление сейсмической активности получена в зонах влияния разломных структур с характерным для них понижением УЭС [Шалагинов и др., 2018; Шапаренко и Неведрова, 2022].

Сейсмологические данные. В связи с постоянным развитием сейсмичности на территории Горловской впадины проводится сейсмологический мониторинг, в том числе с использованием локальных временных сетей в области концентрации землетрясений. Это обеспечивает регистрацию природных и техногенных событий в реальном времени. Непосредственно в Горловской впадине до 2010 г. наблюдались единичные землетрясения с магнитудами M_L не более 3,5. Землетрясения больших энергий начали происходить с 2017 г., например, Колыванское событие 2019 г. с магнитудой $M_L = 4,3$. Далее магнитуды землетрясений только повышаются. При этом глубины до гипоцентров относительно небольшие, более 90% очагов зафиксированы на глубинах менее 8 км с характерным механизмом – взброс и пространственно они приурочены к районам наиболее интенсивной добычи угля открытым способом. Такой механизм характерен для техногенных землетрясений, наблюдаемых при добыче угля в Кузбассе [Еманов и др., 2021; Шалагинов и др., 2018]. Одно из последних крупных событий произошло 27 ноября 2023 г. с магнитудой 4,7 на глубине всего 2 км с механизмом взброс [ФИЦ ЕГС РАН, 1993].

График повторяемости землетрясений в Горловской впадине имеет иной наклон, чем для природных землетрясений Алтае-Саянской горной области. Учитывая повы-

шенную 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 [Еманов и др., 2021]. Пока происходящие землетрясения с магнитудами 4–4,7 нельзя отнести к катастрофическим, хотя они безусловно беспокоят население и по опыту авторов статьи приводят к падению плохо закрепленных конструкций, предметов обихода, что может привести к травматическим случаям в жилой инфраструктуре и авариям в угольных карьерах. Усиление сейсмической активности указывает на важность изучения строения этой зоны, а также на то, что наведенная сейсмичность в данной области может развиваться как усиливающийся со временем опасный процесс, за которым следует наблюдать [Emanov et al., 2020]

Регулярные наблюдения методом электротомографии: интерпретация полевых данных и анализ результатов

Регулярные наблюдения за дальнейшим развитием наведенной сейсмичности в Горловской впадине сейсмологическими методами теперь поддерживаются электроразведкой. Мониторинг методом ЭТ начат весной 2023 года. На обзорной схеме отмечено размещение выбранного участка регулярных наблюдений, показаны разломные нарушения по геологическим данным (жирной красной линией – фрагмент Чемского разлома), линии опытно-методических профилей ЭТ через разные дизъюнктивы, эпицентры взрывов и землетрясений в 2023 г. за период наблюдений, а также контуры угледобывающих карьеров и отвалов (рис. 3).

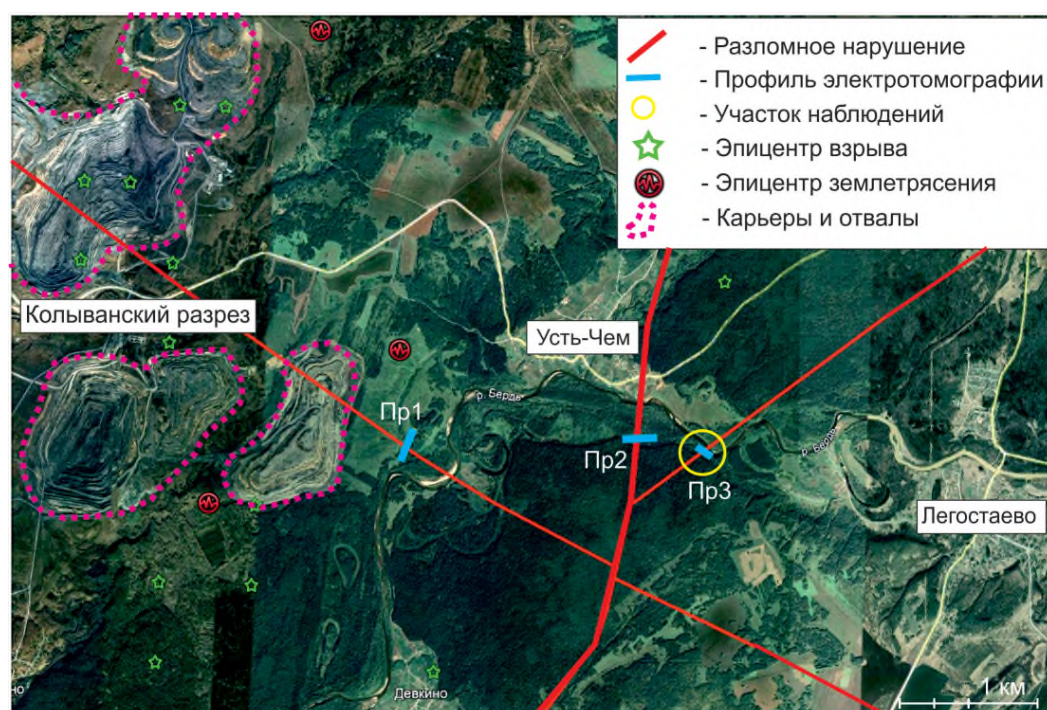


Рис. 3. Обзорная схема района мониторинговых наблюдений методом ЭТ в Горловской впадине.

Очень важным для регулярных наблюдений является выбор оптимального участка. Поэтому на первом этапе были выполнены опытно-методические работы для определения конкретного места размещения мониторингового профиля, а также выбора установок ЭТ и шага между электродами. Пробные (предварительные) измерения были проведены на трех участках, в пределах которых профили разной длины пересекают фрагмент Чемского разлома и двух второстепенных, его оперяющих. Стоит отметить, что все выбранные участки находятся в непосредственной близости от угледобывающих карьеров, в которых проводятся взрывные работы, а также в 5–6 км от области

концентрации сейсмических событий. В ходе измерений были использованы установки Шлюмберже и трехэлектродная с расстоянием между электродами в 5 м.

Интерпретация всех полученных полевых данных ЭТ осуществлялась с помощью 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. [Неведрова и др., 2023]. Разрезы инверсии по профилям 1 и 3 длиной 350 и 220 м соответственно построены до глубины в 40 м (установка Шлюмберже). Для профиля 2 длиной 450 м использована трехэлектродная установка, с которой получена глубинность в 80 м. В самой верхней части всех разрезов залегают более низкоомные отложения с непостоянной мощностью от 10 м (профиль 3) и до 30 м (профили 1, 2), глубже значения УЭС горных пород возрастает в несколько раз. Строение по профилю 3 длиной в 235 м отличается от остальных, т.к. на разрезе в его центральной части выделяется проводящая зона с УЭС значительно ниже вмещающих пород и шириной около 30 м. Эту зону можно отнести к активной разломной структуре (рис. 4). Участок, на котором выполнен профиль 3 и получен разрез с низкоомной зоной, был выбран для мониторинга. Далее на этом участке по размеченному заранее профилю с фиксированным положением электродов были проведены регулярные измерения методом ЭТ с установкой Шлюмберже с интервалом примерно в 2 недели.

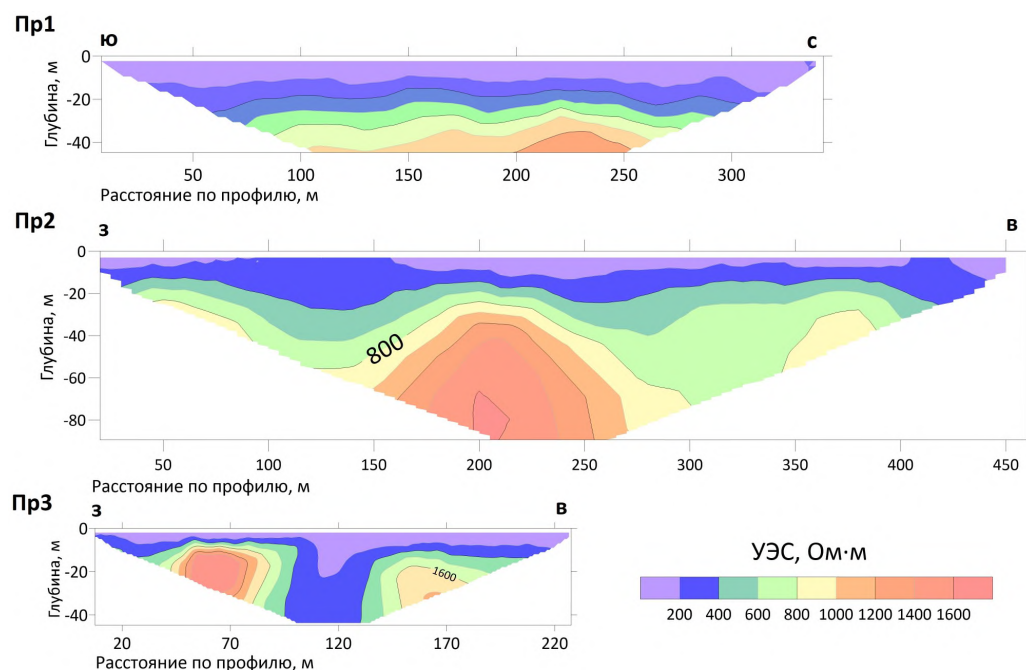


Рис. 4. Разрезы по данным ЭТ по профилям через предполагаемые разломные структуры в зоне сейсмической активизации Горловской впадины (по результатам опытно-методических работ).

Приведем необходимые для анализа сейсмологические данные. За временной период с мая по ноябрь 2023 года на территории Горловской впадины сейсмологами АСФ ФИЦ ЕГС РАН были зафиксированы более 25 событий как реакция на взрывы в карьерах с магнитудами от 2,1 до 3,2 в радиусе 20 км – от центра профиля наблюдения и 5 землетрясений с магнитудами от 2,1 до 3,7 [ФИЦ ЕГС РАН, 1993]. Параметры землетрясений приведены в табл. 1.

Землетрясение 27 ноября 2023 г. произошло после завершения наблюдений в связи с мощным снежным покровом и приведено для демонстрации усиления сейсмичности в районе исследования. Для анализа результатов рассмотрим разрезы по данным ЭТ, полученные до и после произошедших землетрясений 2023 г. и относительные изменения УЭС как примеры реакции измерений на изменения сейсмичности. Для

Таблица 1. Параметры землетрясений за период регулярных наблюдений

№	Дата	Магнитуда	Эпицентральное расстояние, км
1	28.05.2023	3,7	7
2	04.07.2023	2,1	8,5
3	26.09.2023	3,1	14
4	22.10.2023	3,4	8
5	27.11.2023	4,7	5

первого примера выбран временной интервал между измерениями, выполненными 26 мая и 02 июня. Землетрясение с магнитудой 3,7 произошло 28 мая на расстоянии 7 км на запад от начала профиля. Сопоставление разрезов ЭТ до и после события, а также количественная оценка изменений УЭС по разрезу, позволяет сделать вывод, что изменения УЭС после землетрясения были значительными и достигали 55%. При этом наблюдалось уменьшение значений УЭС до 40% в низкоомной разломной зоне, и его увеличение до 40–55% в ограничивающих её высокоомных областях, которые соответствуют коренным породам (рис. 5а).

В следующий временной интервал 4 июля произошло землетрясение с магнитудой 2,1 между измерениями ЭТ 27 июня – 21 июля на эпицентральном расстоянии 8,5 км также от начала профиля в направлении на северо-запад. Характер изменения УЭС разреза и величина вариаций существенно отличается от первого примера. Полученные вариации УЭС находятся в диапазоне от –15% до 10% и изменение знака вариаций происходит непосредственно в разломной зоне (рис. 5б).

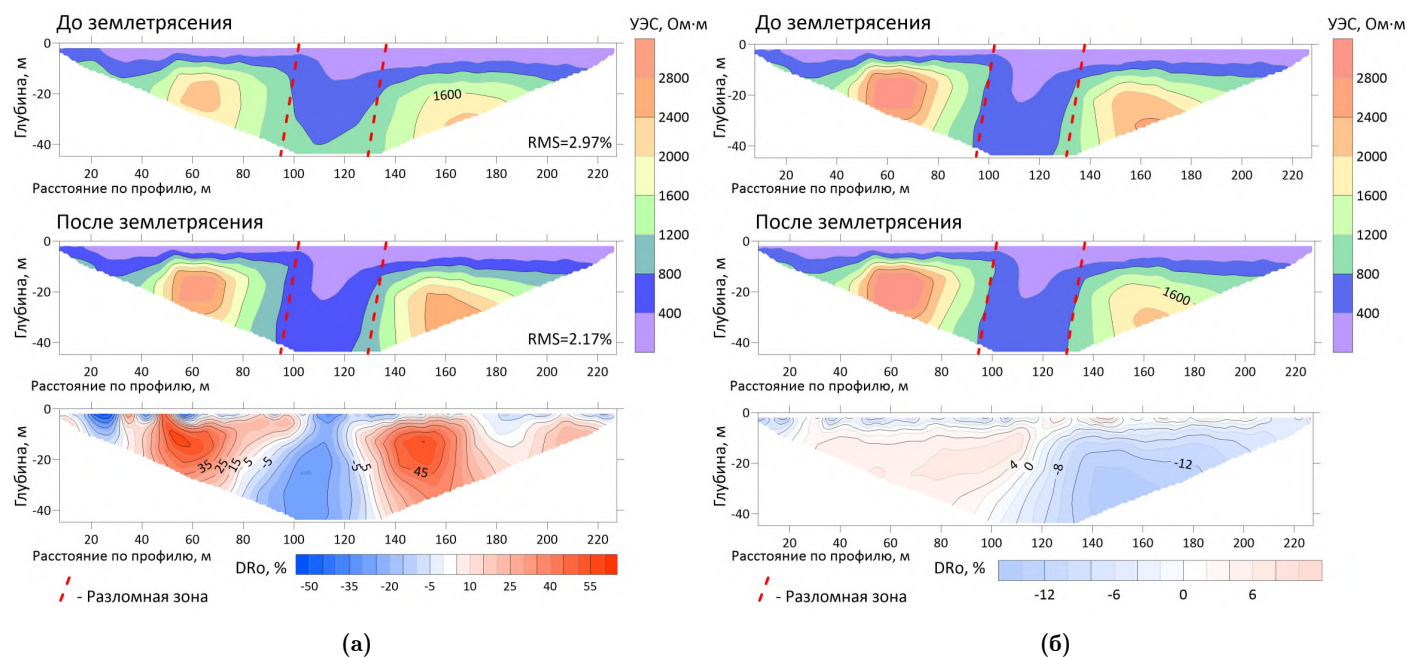


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы по профилю мониторинга ЭТ и относительные изменения УЭС по разрезу, как реакция на природно-техногенные землетрясения; (а) – реакция на землетрясение 28 мая 2023 г. с магнитудой 3.7, (б) – реакция на землетрясение 04 июля 2023 г. с магнитудой 2,1.

Различия в вариациях УЭС как реакции на землетрясения, происходящие в разные временные периоды измерений, очевидно в первую очередь связаны с достаточно большой разницей в магнитудах этих землетрясений, причем с уменьшением магнитуды уменьшаются и вариации. Кроме того, известно, что величина вариаций зависит от направления на эпицентры событий по отношению к положению профиля. Для каж-

дой установки мониторинга имеется диаграмма чувствительности, то есть в каком-то азимуте чувствительность будет максимальной [Неведрова и Эпов, 2012]. В целом вариации УЭС, как отклик на землетрясения, можно объяснить существенным изменением гидрогеологического режима, перераспределением подземных вод под воздействием происходящих сейсмических событий, влияющих на напряженное состояние массива горных пород.

Реакция на взрывы проявляется совершенно иначе по сравнению с электромагнитным откликом на природно-техногенные землетрясения. Приведем два примера. Вначале обратимся к временному интервалу между измерениями 2 и 30 августа 2023 г., в который были зафиксированы взрывы (3 события) с магнитудами 2,2–2,7 на расстояниях от начала профиля в 6,5 км и до 10 км. Однако по результатам анализа геоэлектрических моделей до и после событий были выявлены небольшие вариации УЭС, не превышающие 5–6% по всему разрезу в исследуемом интервале глубин (рис. 6а).

Второй пример приведен для временного интервала 30 августа – 21 сентября 2023 г. (рис. 6б). В это время также произошли взрывы (3 события) с магнитудами 2,8–3,1 на расстояниях от 8 км до 11 км. Вариации УЭС уменьшились по сравнению с первым примером и составляли всего 2–3%. Можно сделать следующий вывод. На взрывы в карьерах также имеется реакция данных ЭТ, но вариации УЭС при этом небольшие, составляют первые единицы процентов. Такие низкие вариации можно объяснить малой глубиной гипоцентров событий, инициированных взрывами и соответственно существенно меньшим объемом геологической среды, на которую они воздействуют.

Таким образом, по результатам анализа вариаций УЭС выявлена разная реакция геологической среды на взрывы в карьерах и землетрясения различной магнитуд. Отличие наблюдается по величине вариаций, которые для землетрясений будут существенно выше даже для относительно слабых по магнитуде событий.

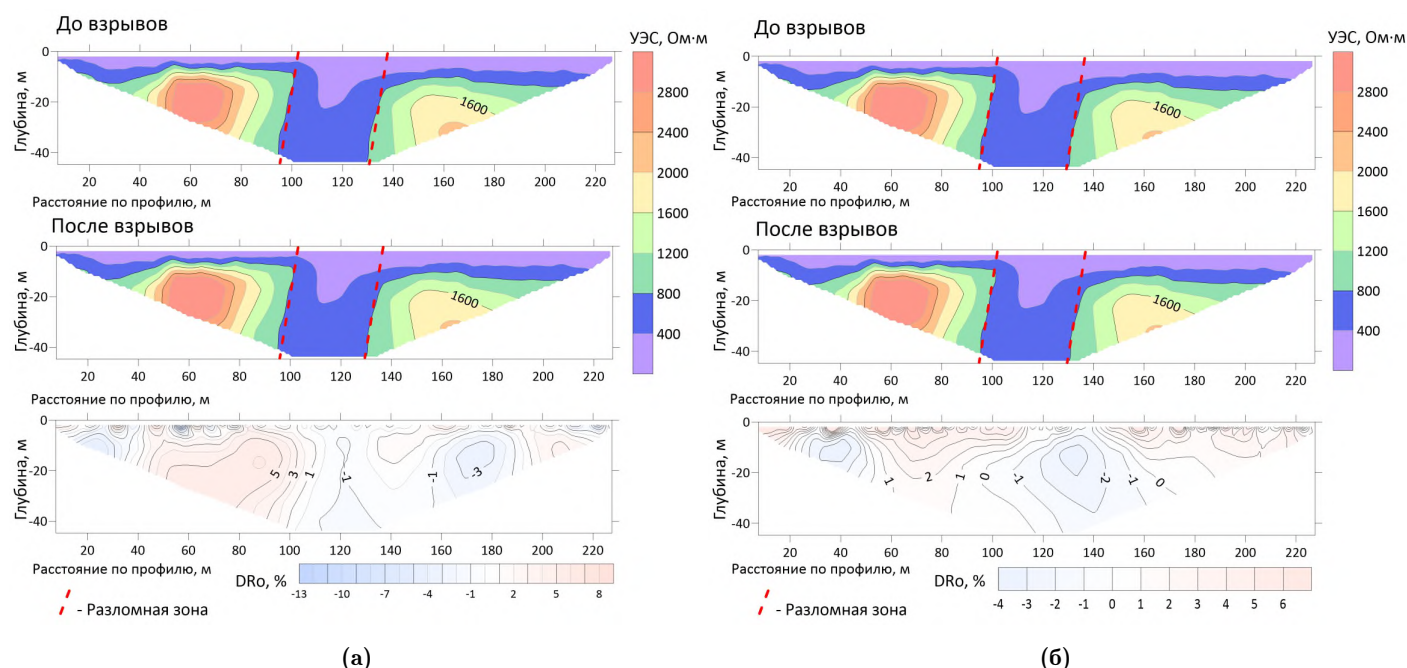


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы по профилю мониторинга ЭТ и относительные изменения УЭС по всему разрезу, как реакция на взрывы; (а) – реакция на взрывы в угольных карьерах в интервале 2 и 30 августа 2023 г., (б) – реакция на взрывы в интервале 30 августа – 21 сентября 2023 г.

Заключение

В результате выполненного исследования определено геоэлектрическое строение в области перехода отложений Горловской впадины к Салаирскому кряжу. По данным

ЭТ разломные зоны выделяются областью пониженных значений УЭС. В ходе опытно-методических работ выбран профиль мониторинговых наблюдений, расположенный всего в нескольких километрах от угледобывающих карьеров и зоны концентрации сейсмических событий. По результатам анализа мониторинга, выполненного в 2023 г. методом ЭТ по профилю наблюдений, выявлена взаимосвязь вариаций УЭС с происходящими сейсмическими событиями.

Мобильный метод электротомографии, использованный для мониторинга, имеет развитые средства измерений и интерпретации, которые постоянно совершенствуются. Интерпретация всех полевых данных ЭТ осуществляется на основе решения обратной задачи для получения распределения истинных удельных электрических сопротивлений разреза. Относительные изменения УЭС (вариации) по разрезу были рассчитаны с использованием модернизированного программного комплекса DiInSo, в который в ходе исследования был добавлен граф обработки данных мониторинга на основе анализа разных схем регуляризации [Неведрова и др., 2023].

Следует сразу отметить, что интерпретация полевых данных за один год наблюдений не позволяет сделать полноценные выводы, тем не менее, уже убедительно показано, что вариации геоэлектрических параметров отражают реакцию геологической среды на природно-техногенные землетрясения, при этом величина вариаций значительна, достигает 50% и зависит:

1. от магнитуды события: с уменьшением магнитуды уменьшаются и вариации УЭС;
2. от направления на эпицентр, предварительно повышенная чувствительность установки ЭТ наблюдается в западном направлении;
3. от эпицентрального расстояния землетрясения, которое измеряется от центра установки до эпицентра.

В ответ на техногенные воздействия (взрывы в карьерах) выявлены небольшие вариации УЭС от 5–6% до 2–3%, что позволяет отличать реакцию на взрывы и землетрясения. За весь период регулярных наблюдений было зафиксировано более 25 техногенных воздействий (взрывов) с магнитудами от 2,1 до 3,2 и эпицентральными расстояниями от 3 до 20 км до центра профиля наблюдения. Мониторинг на выбранном участке продолжается в 2024 г., что позволит подтвердить и уточнить сделанные выводы.

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

Список литературы

- Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. — Москва : ИДГ РАН, 2015. — EDN: TXLGWD.
- Еманов А. Ф., Еманов А. А., Павленко О. В. и др. Колыванское землетрясение 09.01.2019 г. с $M_L = 4.3$ и особенности наведенной сейсмичности в условиях Горловского угольного бассейна // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2019. — Т. 46, № 4. — DOI: [10.21455/vis2019.4-2](https://doi.org/10.21455/vis2019.4-2).
- Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с $M_L = 6.1$, $I_0 = 7$ (Кузбасс) // Российский сейсмологический журнал. — 2020а. — Т. 2, № 1. — С. 48–61. — DOI: [10.35540/2686-7907.2020.1.05](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05).
- Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В. и др. Техногенные сейсмические активизации в Кузбассе и Горной Шории // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2020b. — Т. 2. — С. 5–18. — DOI: [10.25558/VOSTNIK.2020.94.41.001](https://doi.org/10.25558/VOSTNIK.2020.94.41.001).
- Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В. и др. Техногенная сейсмическая активизация в районе Горловского угольного бассейна // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2021. — Т. 8, № 1. — С. 207–210. — DOI: [10.15372/FPVGN2021080132](https://doi.org/10.15372/FPVGN2021080132).
- Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Книга 2. Макросейсмичность / под ред. Н. В. Шарова, А. А. Маловичко, Ю. К. Щукина. — Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2007.

- Кишкина С. Б., Кочарян Г. Г., Будков А. М. *и др.* Воздействие горных работ разрезов Горловского бассейна на очаги землетрясений значительной магнитуды // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2021. — № 4. — С. 11–23. — DOI: [10.15372/FTP20210402](https://doi.org/10.15372/FTP20210402).
- Котельников А. Д., Максиков С. В., Котельникова И. В. *и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Кузбасская. Лист N-44-XVIII - Черепаново. Объяснительная записка. — Москва : ВСЕГЕИ, 2015.
- Неведрова Н. Н., Шалагинов А. Е., Мариненко А. В. *и др.* Развитие программно-алгоритмических средств для обработки и интерпретации данных мониторинга методом электротомографии // 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).
- Неведрова Н. Н., Эпов М. И. Электромагнитный мониторинг в сейсмоактивных районах Сибири // Геофизический журнал. — 2012. — Т. 34, № 4. — С. 209–223.
- Санчаа А. М., Неведрова Н. Н., Бабушкин С. М. *и др.* Первые результаты исследований Горловской впадины наземными методами электроразведки с контролируемыми источниками // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2021. — Т. 2, № 2. — С. 272–279. — DOI: [10.33764/2618-981X-2021-2-2-272-279](https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-2-272-279).
- Сотников В. И., Федосеев Г. С., Кунгурцев Л. В. *и др.* Геодинамика, магматизм, и металлогения Колывань-Томской складчатой зоны. — Новосибирск : СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999.
- ФИЦ ЕГС РАН. Информация Службы срочных донесений. — 1993. — URL: <http://www.gsras.ru/new/ssd.htm> (дата обр. 05.08.2024).
- Шалагинов А. Е., Неведрова Н. Н., Бабушкин С. М. Геоэлектрическое строение разломного ограничения Горловского прогиба Новосибирской области по данным нестационарных электромагнитных зондирований // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2023. — Т. 2, № 4. — DOI: [10.33764/2618-981X-2023-2-4-61-67](https://doi.org/10.33764/2618-981X-2023-2-4-61-67).
- Шалагинов А. Е., Неведрова Н. Н., Шапаренко И. О. Вариации электрофизических параметров по данным электромагнитного мониторинга как индикатор активности разломных зон // Геодинамика и тектонофизика. — 2018. — Т. 9, № 1. — С. 93–107. — DOI: [10.5800/GT-2018-9-1-0339](https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0339).
- 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. — Тверь : ПолиПРЕСС, 2022. — С. 14–17. — EDN: THRFMF.
- Emanov A. F., Emanov A. A., Pavlenko O. V., *et al.* Kolyvan Earthquake of January 9, 2019, with $M_L = 4.3$ and Induced Seismicity Features of the Gorlovsky Coal Basin // Seismic Instruments. — 2020. — Vol. 56, no. 3. — P. 254–268. — DOI: [10.3103/S0747923920030020](https://doi.org/10.3103/S0747923920030020).

STRUCTURE AND MONITORING IN THE SEISMIC ACTIVATION ZONE OF THE GORLOVSKAYA DEPRESSION OF THE ALTAI-SAYAN FOLDED REGION ACCORDING TO ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY DATA

N. N. Nevedrova¹ , A. E. Shalaginov^{1,*} , I. O. Shaparenko¹ ,
A. M. Sanchaa¹ , and A. V. Marinenko¹ 

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences
**Correspondence to: Alexander E. Shalaginov, shalaginovae@ipgg.sbras.ru.

In the last decade, the intensity of development of the Gorlovskoye coal deposit has increased significantly, which leads to the formation of seismic activation of the subsoil of the Gorlovka depression in response to man-made impact. Since 2019, earthquakes with a magnitude of more than 4 have been recorded in the area of the deposit, felt in Novosibirsk and its suburbs. The main objective of the study: as data accumulates, to identify the criteria for seismic activations using one of the methods of ground-based electrical exploration – electrical resistivity tomography. The article considers the geoelectric structure of the Gorlovka depression in the area of the transition from its deposits to the Salair ridge, and also analyzes the results of monitoring carried out in 2023 by the electrical resistivity tomography method along a profile intersecting one of the fault structures. The monitoring observation profile is located on a site selected during experimental and methodological work and is located just a few kilometers from coal quarries and the zone of concentration of seismic events. It was found that the identified variations in geoelectric parameters reflect the reaction of the geological environment not only to earthquakes occurring during the observation period, but also to man-made impacts (explosions).

Keywords: Gorlovskaya depression, natural and man-made seismicity, geophysical monitoring, electrical resistivity tomography, electrical conductivity variations, measurement techniques, software, inversion.

Received: 21 August 2024
Accepted: 25 October 2024
Published: 13 November 2024



© 2024. The Authors.

Citation: Nevedrova, N. N., A. E. Shalaginov, I. O. Shaparenko, A. M. Sanchaa, and A. V. Marinenko (2024), Structure and Monitoring in the Seismic Activation Zone of the Gorlovskaya Depression of the Altai-Sayan Folded Region According to Electrical Resistivity Tomography Data, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES5003, <https://doi.org/10.2205/2024ES000947>, EDN: JTUSOL

References

- Adushkin V. V., Turuntaev S. B. Man-made seismicity – induced and triggered. — Moscow : IDG RAS, 2015. — EDN: TXLGWD.
- Earthquakes and microseismicity in modern geodynamics problems on the East European platform. Part 2. Microseismicity / ed. by N. V. Sharov, A. A. Malovichko, Y. K. Shchukin. — Petrozavodsk : Karelian Scientific Center of the RAS, 2007.
- Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V. Bachatskiy induced earthquake on June 18, 2013, $M_L = 6.1$, $I_0 = 7$ (Kuzbass) // *Russian Journal of Seismology*. — 2020a. — Vol. 2, no. 1. — P. 48–61. — DOI: [10.35540/2686-7907.2020.1.05](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05).

- Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., *et al.* Technogenic seismic activation in Kuzbass and mountain Shoria // Bulletin of the Scientific Center of VostNII Industrial and Environmental Safety. — 2020b. — Vol. 2. — P. 5–18. — DOI: [10.25558/VOSTNII.2020.94.41.001](https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2020.94.41.001).
- Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., *et al.* Technogenic seismic activation in Gorlovsky coal basin area // Fundamental and applied issues of mining. — 2021. — Vol. 8, no. 1. — P. 207–210. — DOI: [10.15372/FPVGN2021080132](https://doi.org/10.15372/FPVGN2021080132).
- Emanov A. F., Emanov A. A., Pavlenko O. V., *et al.* Kolyvan earthquake 09.01.2019 with $M_L = 4.3$ and features of induced seismicity in the conditions of the Gorlovsky coal basin // Problems of Engineering Seismology. — 2019. — Vol. 46, no. 4. — DOI: [10.21455/vis2019.4-2](https://doi.org/10.21455/vis2019.4-2).
- Emanov A. F., Emanov A. A., Pavlenko O. V., *et al.* Kolyvan Earthquake of January 9, 2019, with $M_L = 4.3$ and Induced Seismicity Features of the Gorlovsky Coal Basin // Seismic Instruments. — 2020c. — Vol. 56, no. 3. — P. 254–268. — DOI: [10.3103/S0747923920030020](https://doi.org/10.3103/S0747923920030020).
- Geophysical Survey of RAS. Last EarthQuake (by Alert Service). — 1993. — (visited on 2024/08/05). <http://www.gstras.ru/new/ssd.htm>.
- Kishkina S. B., Kocharyan G. G., Budkov A. M., *et al.* Impact of Open Pit Mining in Gorlovka Coal Basin on Large Earthquakes // Journal of Mining Science. — 2021. — Vol. 57, no. 4. — P. 546–556. — DOI: [10.1134/s1062739121040025](https://doi.org/10.1134/s1062739121040025).
- Kotelnikov A. D., Maksikov S. V., Kotelnikova I. V., *et al.* State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Second Edition. Kuzbass Series. Sheet N-44-XVIII – Cherepanovo. Explanatory Note. — Moscow : VSEGEI, 2015.
- Nevedrova N. N., Epov M. I. Electromagnetic monitoring in seismically active regions of Siberia // Geophysical Journal. — 2012. — Vol. 34, no. 4. — P. 209–223.
- Nevedrova N. N., Shalaginov A. E., Marinenko A. V., *et al.* Software and Algorithmic Tools Development for Processing and Interpretation Electrotomography Monitoring Data // Vestnik NSU. Series: Information Technologies. — 2023. — Vol. 21, no. 3. — P. 32–45. — DOI: [10.25205/1818-7900-2023-21-3-32-45](https://doi.org/10.25205/1818-7900-2023-21-3-32-45).
- Sanchaa A. M., Nevedrova N. N., Babushkin S. M., *et al.* First results of studies in the Gorlovskaya values by ground methods of electric exploration with controlled sources // Interexpo GEO-Siberia. — 2021. — Vol. 2, no. 2. — P. 272–279. — DOI: [10.33764/2618-981X-2021-2-2-272-279](https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-2-272-279).
- Shalaginov A. E., Nevedrova N. N., Babushkin S. M. Geoelectric structure of fault zone of the Gorlovka depression of Novosibirsk region according to the TEM data // Interexpo GEO-Siberia. — 2023. — Vol. 2, no. 4. — DOI: [10.33764/2618-981X-2023-2-4-61-67](https://doi.org/10.33764/2618-981X-2023-2-4-61-67).
- Shalaginov A. E., Nevedrova N. N., Shaparenko I. O. Variations in electrophysical parameters estimated from electromagnetic monitoring data as an indicator of fault activity // Geodynamics & Tectonophysics. — 2018. — Vol. 9, no. 1. — P. 93–107. — DOI: [10.5800/GT-2018-9-1-0339](https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0339).
- Shaparenko I. O., Nevedrova N. N. Application of the electrical resistivity tomography method for studying fault structures (using the Altai Mountains as an example) // Geosochi-2022. Current state and development prospects of engineering geophysics. — Tver : PoliPRESS, 2022. — P. 14–17. — EDN: THRFMF.
- Sotnikov V. I., Fedoseyev G. S., Kungurtsev L. V., *et al.* Geodynamics, magmatism, and metallogeny of the Kolyvan-Tomsk folded zone. — Novosibirsk : SB RAS, NRC OIGGM, 1999.