

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГУЛЯРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТОДОМ
ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ В ГОРЛОВСКОЙ ВПАДИНЕ
АЛТАЕ-САЯНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИА. Е. Шалагинов^{*}¹, Н. Н. Неведрова¹, И. О. Шапаренко¹ и Е. В. Балков¹¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия
^{*} **Контакт:** Александр Евгеньевич Шалагинов, shalaginovae@ipgg.sbras.ru

В статье представлены результаты исследования сейсмической активности в Горловской впадине (Новосибирская область) методом электротомографии. В этом районе с 2017 года наблюдается рост числа землетрясений с магнитудами до $M = 4,7$, связанных с интенсивной добычей угля открытым способом. Цель исследования – определение критериев проявления природных и природно-техногенных опасных процессов на основе анализа данных одного из методов наземной электроразведки – электротомографии. Из анализа данных метода электротомографии, полученных в результате регулярных наблюдений в 2023–2024 гг., выявлены значимые вариации удельного электрического сопротивления ($УЭС$) в разломных зонах после сейсмических событий, установлена азимутальная зависимость вариаций $УЭС$ от направления на эпицентр землетрясения. Для количественной оценки разностных разрезов рассчитан параметр Dr , показавший зависимость от магнитуды и эпицентрального расстояния.

Ключевые слова: Горловская впадина, сейсмическая активность, геофизический мониторинг, электротомография, вариации электропроводности, инверсия.

Цитирование: Шалагинов А. Е., Неведрова Н. Н., Шапаренко И. О., Балков Е. В.

Результаты регулярных наблюдений методом электротомографии в Горловской впадине Алтае-Саянской складчатой области // Russian Journal of Earth Sciences. — 2026. — Т. 26. — ES1007. — DOI: 10.2205/2026es001056 — EDN: MWADVP

Введение

Горловская впадина вместе с окружающими её складчатыми структурами находится на юго-востоке Новосибирской области. Эта узкая и глубокая грабен-синклиналь, зажата между Салаирским антиклинорием и Кольвань-Томской складчатой зоной, характеризуется интенсивной линейной складчатостью, осложнённой разрывными нарушениями [Гладышев и др., 2024]. В начале прошлого столетия в Горловской впадине были разведаны и начали разрабатываться уникальные месторождения антрацита, которые и в настоящее время активно используются. На её территории в последние годы по инструментальным сейсмологическим наблюдениям усиливается сейсмическая активность, причём эпицентры землетрясений в основном концентрируются в пределах крупных угледобывающих карьеров, расположенных примерно в 60 км от г. Новосибирска и в 30 км от научного центра «Академгородок».

Непосредственно в Горловской впадине до 2010 г. сейсмологами Алтае-Саянского филиала Единой Геофизической службы РАН фиксировались единичные землетрясения с магнитудами M_L не более 3,5. Землетрясения больших энергий начали происходить с 2017 года, например, Кольванское событие в 2019 г. с магнитудой $M_L = 4,3$ [Еманов и др., 2019]. Далее магнитуды землетрясений только повышались. При этом глубины гипоцентров относительно небольшие, более 90% очагов зафиксированы на глубинах

<https://elibrary.ru/MWADVP>

Получено: 27 мая 2025 г.

Принято: 4 сентября 2025 г.

Опубликовано: 16 марта 2026 г.



© 2026. Коллектив авторов.

менее 8 км с характерным механизмом – взброс, и пространственно они приурочены к районам наиболее интенсивной добычи угля открытым способом. Отличительной особенностью этого сейсмического процесса является нехватка землетрясений малых энергий – для соблюдения закона Гутенберга – Рихтера их явно недостаточно. Начиная с 2019 г. обращает на себя внимание также интенсификация процесса на уровне магнитуд $M_L = 1-3,5$ [Еманов и др., 2021].

Имеющиеся факты указывают на то, что из-за интенсивной разработки угольных месторождений сейсмическая активность может иметь техногенную составляющую. В частности, в качестве примера можно рассмотреть землетрясение, зарегистрированное 27 ноября 2023 г., которое является наибольшим по энергии во всем ряде сейсмических событий в районе Горловского прогиба. Оно произошло в угольном карьере «Кольванский» с глубиной до гипоцентра около 3 км и $M = 4,64$ после промышленного взрыва магнитудой 1,7. Промышленный взрыв всего за 2 секунды до землетрясения мог быть спусковым крючком, триггером, вызвавшим землетрясение, а основной причиной являются интенсивные горные работы, связанные с переносом огромного объема грунта, изменением рельефа в присутствии тектонических напряжений (рис. 1). Усиление процесса воздействия на напряжённое состояние, когда нагрузки на вмещающую среду, обусловленные также и техногенными причинами, не успевают перераспределяться в массиве горных пород, способно вывести сейсмичность на уровень более высоких значений магнитуд, что создаст реальную опасность для существующей жилой и промышленной инфраструктуры Горловского бассейна [Еманов и др., 2021]. Сейсмическая активность, возникающая вблизи объектов повышенной опасности и крупных населённых пунктов, требует регулярных наблюдений. Увеличение числа сейсмических событий в 2020–2024 годах, в том числе землетрясение с магнитудой до 4,7, свидетельствует о дальнейшем возрастании сейсмической активности в Горловской впадине и обуславливает актуальность проводимого исследования.

Цель исследования – определение критериев проявления природных и природно-техногенных опасных процессов на основе анализа данных геофизического мониторинга с привлечением методов геоэлектрики. К актуальным задачам относится также разделение влияния взрывных работ в угледобывающих карьерах от регулярно происходящих землетрясений, зафиксированных сейсмологами. Заделом для применения электроразведки служат результаты комплекса методов (зондирование становлением электромагнитного поля, вертикальные электрические зондирования, электротомографии), которые использованы ранее в 2019–2022 гг. для построения геоэлектрических моделей Горловской впадины в зоне сейсмической активизации [Санчаа и др., 2021; Шалагинов и др., 2023].

Регулярные наблюдения методом электротомографии. Результаты интерпретации

Наблюдения за дальнейшим развитием сейсмичности в Горловской впадине помимо сейсмологических методов теперь дополняются одним из современных методов наземной электроразведки – электротомографией (ЭТ), предназначенным для решения самого широкого спектра задач. В частности, ЭТ востребован как для статических исследований при определении структуры и геоэлектрических параметров горного массива на глубину до 100–200 м, так и для изучения различных геодинамических, гидрохимических, геоэкологических и инженерно-геологических процессов, характеризующихся изменениями параметров среды [Рязанцев и др., 2017]. Поскольку зоны сейсмической активности, как правило, приурочены к участкам разрывных нарушений, то в условиях перекрытия последних толщей осадочных пород, метод ЭТ в статическом варианте широко применяется для выявления и локализации таких участков. После чего проводится мониторинг геоэлектрических параметров выявленных зон в режиме покадровой электротомографии (time-lapse electrical resistivity tomography) на предмет выявления их изменений.

Регулярные наблюдения этим методом были начаты весной 2023 г. и продолжались до ноября 2024 г. непосредственно в зоне сейсмической активизации Горловского бассейна. Они дают возможность проследить периоды подготовки и реализации происходящих землетрясений и по мере накопления данных выявить критерии сейсмических

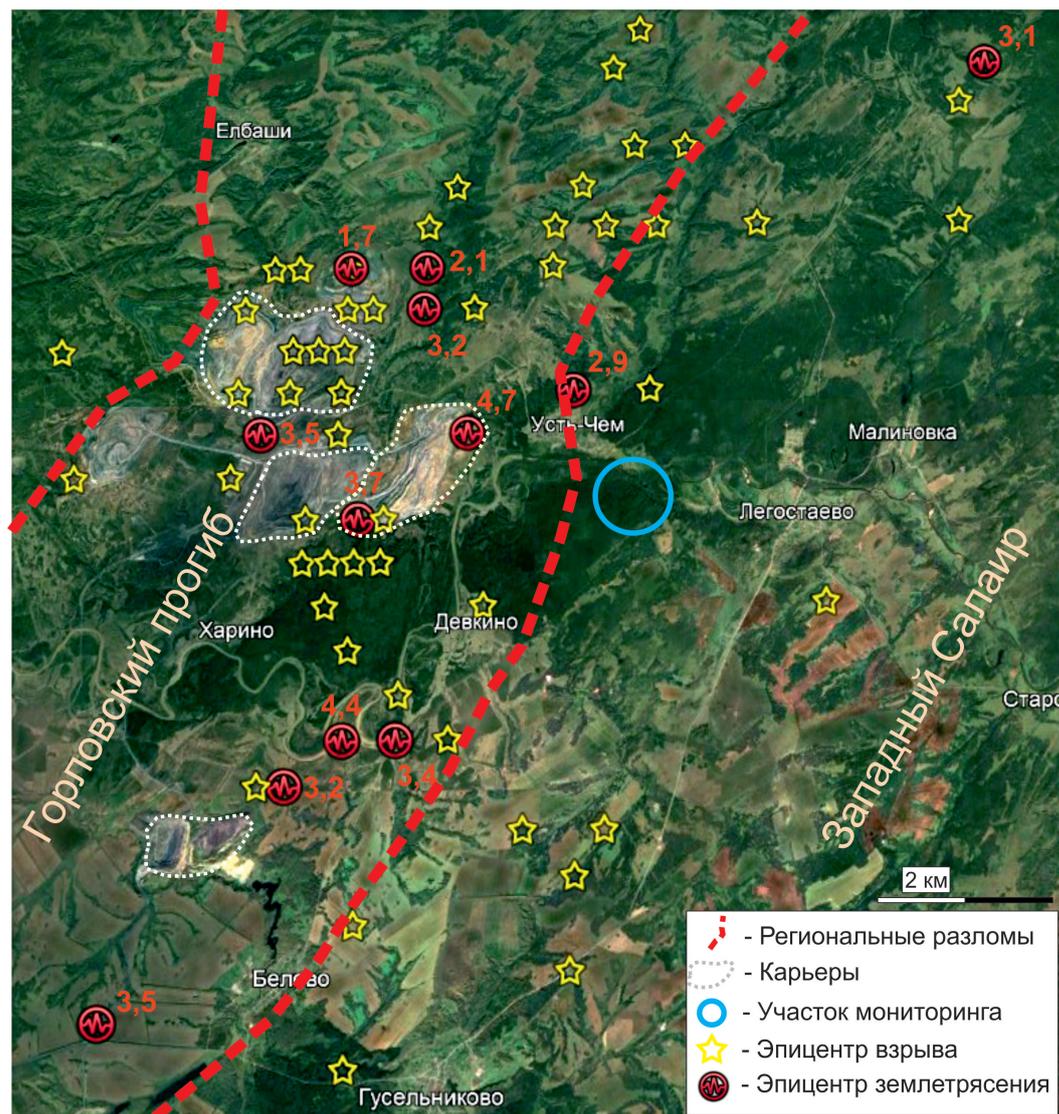


Рис. 1. Схема распределения эпицентров землетрясений и промышленных взрывов за период 2023–2024 гг. в зоне сейсмической активизации Горловской впадины.

активизаций. Предварительные результаты регулярных наблюдений 2023 г. показывают, что выявленные вариации УЭС на участке исследования являются реакцией на происходящие землетрясения и взрывы [Неведрова и др., 2024]. На рис. 1 показан участок, где выполняются мониторинговые измерения методом ЭТ, кроме того, отмечены действующие угольные карьеры (Восточный, Колыванский, Беловский), эпицентры землетрясений и промышленных взрывов за годы наблюдений, региональные разломы, ограничивающие впадину.

Анализ сейсмологических данных свидетельствует, что большая часть эпицентров землетрясений за 2023–2024 гг. расположены в районе угледобывающих карьеров. Рассмотрение результатов по геоэлектрическому строению Горловской впадины, полученных ранее комплексом методов наземной электроразведки с контролируруемыми источниками, позволило в начале полевого сезона 2023 г. выбрать участок для регулярных наблюдений в зоне перехода от отложений впадины к Салаирскому кряжу. В этой зоне впадину с востока ограничивает крупный региональный разлом – Томско-Каменский надвиг, наиболее близко проходящий от угледобывающих карьеров. Данный надвиг шириной до 4 км включает серию дизъюнктивных нарушений. Предполагается листрический характер надвига и его выполаживание с глубиной в северо-западном направлении [Кишкина и др., 2021].

На участке мониторинга профиль измерений пересекает оперяющийся разлом, сочленяющийся с Томско-Каменским надвигом. На схематическом разрезе вкрест простирания Горловской впадины, построенном С. Б. Кишкиной с соавторами [Кишкина и др., 2021], красным овалом отмечено примерное расположение участка мониторинга в зоне влияния серии крупных дизъюнктивных нарушений (рис. 2).

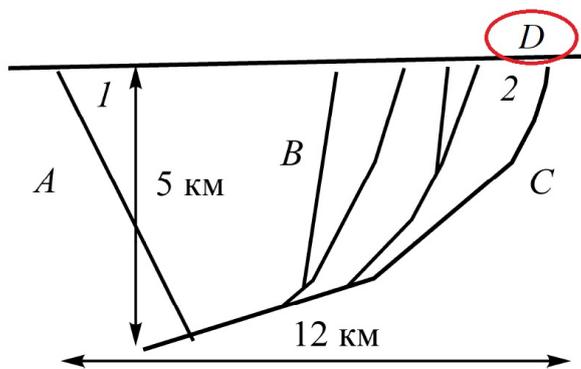


Рис. 2. Схематический разрез Горловской угленосной грабен-синклинали по [Санчаа и др., 2021]: А – Колывань-Томская зона; В – зона Горловского прогиба; С – Западно-Салаирская зона; D – участок мониторинга; 1 – западный бортовой разлом прогиба; 2 – Томско-Каменский надвиг, ограничивающий прогиб с востока.

Участок мониторинга расположен в 4 км от п. Легостаево Искитимского района Новосибирской области, и находится в 5–7 км от области концентрации сейсмических событий у угольных карьеров Колыванский и Восточный (рис. 1). Такой выбор был также обусловлен возможной активизацией близко расположенных разломов, в зоне которых будут проводиться измерения. Местоположение мониторингового профиля было зафиксировано там, где разлом хорошо выделяется в геоэлектрическом разрезе в виде зоны с пониженными значениями удельного электрического сопротивления (400–600 Ом·м) относительно более высокоомных вмещающих горных пород (2000–3000 Ом·м), погрешность подбора геоэлектрической модели составила 2,63% (рис. 3).

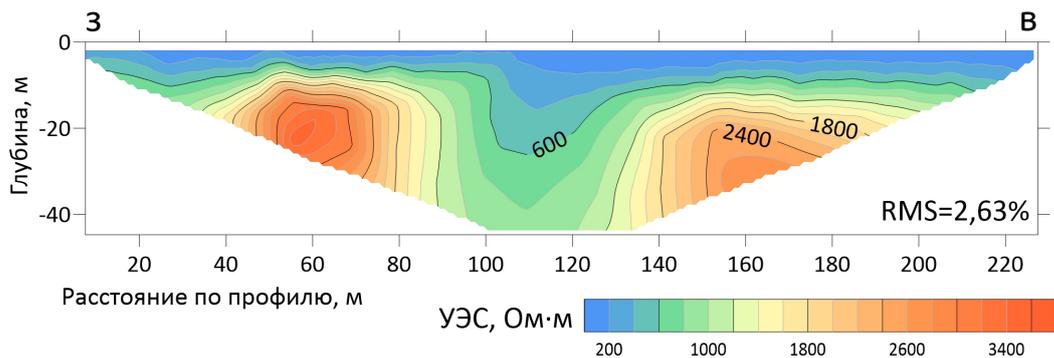


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по профилю мониторинга ЭТ. Размещение участка регулярных наблюдений показано на рис. 1.

Следует отметить, что для выбора оптимального места для выполнения мониторинговых наблюдений методами электроразведки в сейсмоактивном районе необходимы сведения о его геоэлектрическом строении, положении разломных структур и эпицентров землетрясений. Далее на участке проводятся опытно-методические работы, в ходе которых выявляется активная разломная зона, характеризующаяся пониженными значениями удельного электрического сопротивления (УЭС), а также в случае использования метода электротомографии определяются оптимальные размеры профиля наблюдений, установки и шаг между электродами.

Далее приведём необходимые для анализа данных мониторинга ЭТ сейсмологические данные. За временные периоды полевых мониторинговых измерений ЭТ с мая по ноябрь 2023 и 2024 годов на территории Горловской впадины сейсмологами АСФ ФИЦ ЕГС РАН были зафиксированы 7 землетрясений с магнитудами от 2,1 до 3,7 и более 40 событий реакции на взрывы в карьерах с магнитудами от 2,1 до 3,2 в радиусе примерно 15 км – от центра профиля наблюдения [ФИЦ ЕГС РАН, 1993]. Координаты эпицентров, даты событий, другие параметры землетрясений приведены в табл. 1. Регулярные измерения методом ЭТ выполнялись в весенне-летне-осенний период. Всего за время полевых работ было выполнено 21 мониторинговое наблюдение с примерно равным интервалом между измерениями.

Таблица 1. Параметры землетрясений за период регулярных наблюдений

№	Координаты	Дата	Магнитуда	Эпицентральное расстояние, км	Эпицентральный угол, градусы
1	54,64; 83,65	28.05.2023	3,7	7	262
2	54,70; 83,67	04.07.2023	2,1	8	316
3	54,75; 83,89	26.09.2023	3,1	14	37
4	54,59; 83,67	22.10.2023	3,4	8,5	220
5	54,67; 83,73	24.06.2024	2,9	3,0	325
6	54,70; 83,64	14.07.2024	1,7	9,5	307
7	54,66; 83,61	13.09.2024	3,5	9,5	277

Интерпретация полевых данных выполнена с использованием разработанного нового программного комплекса «ERT_monitoring», предназначенного для обработки двумерных данных мониторинга электротомографии на постоянном токе, наблюдаемых в течение некоторого промежутка времени. При разработке программных средств были учтены факторы, влияющие на эффективность разных подходов и выбраны оптимальные схемы регуляризации для задач мониторинга. Комплекс позволяет получить количественные оценки вариаций УЭС в процентах и определить область разреза с присутствием максимальных изменений этого параметра [Заявка. . ., 2024]. В ходе интерпретации с использованием указанной программы были построены разностные разрезы, отражающие изменения (относительные вариации) удельного электрического сопротивления между двумя измерениями.

В первую очередь были рассмотрены данные мониторинга ЭТ для периодов, во время которых произошли землетрясения. Для них по результатам оценки величины вариаций УЭС было выявлено отличие отклика геологической среды на землетрясения различной магнитуды. В качестве примеров далее рассмотрим разностные разрезы для оценки величины вариаций по профилю регулярных наблюдений до и после происходящих землетрясений (рис. 4). Для всех временных интервалов, между которыми были зафиксированы землетрясения с магнитудами в диапазоне от 1,7 до 3,7, реакция отмечается значимыми вариациями УЭС, которые существенно превышают погрешности подбора геоэлектрических моделей для каждого периода измерений (погрешности подбора всех моделей в диапазоне 2,17–2,73%). Различия в вариациях УЭС как реакции на землетрясения в разные временные периоды, очевидно в первую очередь связаны с достаточно большой разницей в магнитудах этих землетрясений, причём с уменьшением магнитуды уменьшаются и вариации.

Для первого примера выбран интервал между измерениями ЭТ 2023 года, выполненными 27 июня и 21 июля 2023 г. В этом интервале 4 июля произошло землетрясение с магнитудой 2,1 на эпицентральном расстоянии 7 км от центра профиля наблюдений с азимутом 316°. Полученные вариации УЭС находятся в диапазоне от –15 до +10%, и изменение знака вариаций происходит непосредственно по разломной зоне (рис. 4а).

Между измерениями 21 сентября и 5 октября 2023 года на расстоянии 14 км от профиля наблюдения 26 сентября произошло землетрясение с магнитудой 3,1, однако вариации УЭС для этого периода получены небольшие в диапазоне от –4 до +5%. Стоит

отметить, что азимутальное направление на эпицентр этого землетрясения существенно отличается от направлений на эпицентры остальных землетрясений и составляет 37° , кроме того, это событие произошло на самом большом эпицентральной расстоянии от профиля наблюдений (рис. 4б).

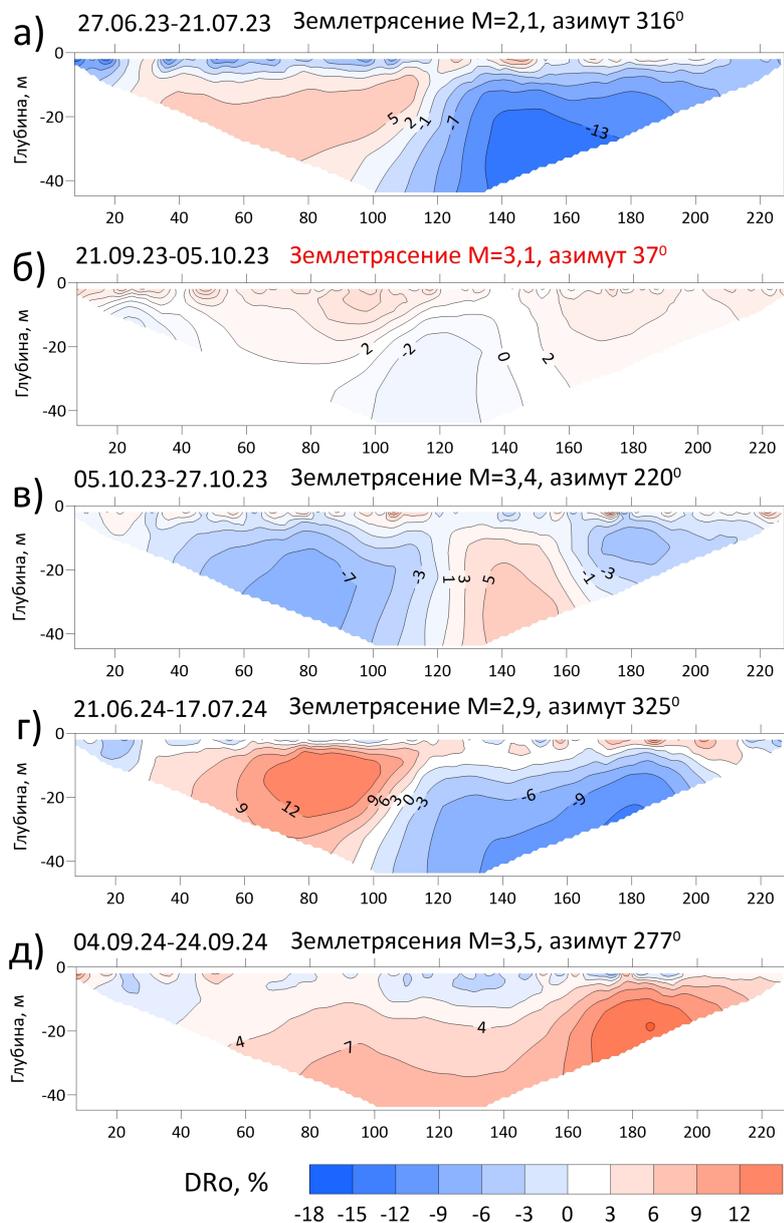


Рис. 4. Разностные разрезы по данным ЭТ, отражающие отклик геологической среды на происходящие землетрясения в районе исследования Горловской впадины.

Рассмотрены измерения 5 и 27 октября 2023 года. На расстоянии 8,5 км от профиля наблюдения 22 октября произошло достаточно сильное землетрясение с магнитудой 3,4 на с азимутом 220° . Полученные вариации УЭС находятся в диапазоне от -8% до $+10\%$, и также отмечается смена знака вариаций непосредственно по разломной зоне (рис. 4в).

Следующий временной интервал соответствует измерениям ЭТ 2024 года, выполненным 21 июня и 17 июля 2024 г., когда произошло два землетрясения: 24 июня с магнитудой 2,9 и с эпицентральной расстоянием в 3 км и 14 июля с магнитудой 1,7 на расстоянии 9,5 км. Эпицентры расположены примерно по близким азимутам – 325° и 307° соответственно. Полученные вариации УЭС находятся в диапазоне от -18% до

+13%, т. е. в северо-западной части разреза ЭТ наблюдалось повышение электрического сопротивления, а в юго-западной его понижение. Изменение знака вариаций, как и в 2023 г. происходит непосредственно в разломной зоне (рис. 4г).

Далее 13 сентября 2024 г. произошло землетрясение с магнитудой 3,5 между измерениями 4 и 24 сентября 2024 г. на эпицентральной расстоянии 9,5 км с азимутом 277°. Характер изменения УЭС разреза и величина вариаций отличается от других примеров. Полученные вариации УЭС находятся в диапазоне от -8% до +17% и отмечается постепенное увеличение вариаций УЭС с глубиной, начиная от юго-восточной границы разломной зоны (рис. 4д).

На основании приведённых примеров можно сделать следующие предварительные выводы. Все землетрясения, кроме одного, произошли в области угледобывающих карьеров, при этом реакция геоэлектрических параметров на них разная. Показано, что влияют как энергетические (магнитуды), так и геометрические параметры землетрясений (эпицентральные расстояния, азимуты на эпицентр).

Таким образом, анализ результатов показал, что величина вариаций УЭС напрямую зависит от магнитуды события, при увеличении магнитуды возрастают и вариации. Влияет направление на эпицентры событий по отношению к центральной точке профиля мониторинга, т. е. величины азимутального угла. Можно отметить, что зависимость от азимута была получена в предшествующих результатах мониторинга электромагнитными методами в Байкальской рифтовой зоне, Горном Алтае. Было показано, что для каждой установки мониторинга имеется диаграмма чувствительности, то есть в каком-то азимуте наблюдалась её максимальная чувствительность [Неведрова и Энов, 2004; Неведрова и др., 2004].

В целом значимые вариации УЭС, как отклик на землетрясения, можно объяснить существенным изменением гидрогеологического режима, перераспределением подземных вод под воздействием происходящих сейсмических событий, влияющих на напряжённое состояние массива горных пород и геоэлектрические параметры, особенно в трещиноватых разломных зонах.

Реакция геологической среды на взрывы иная по сравнению с землетрясениями, поэтому и отклик в виде вариаций УЭС также будет отличаться. Можно полагать, что взрывы влияют на существенно меньший, приповерхностный объём горных пород в отличие от землетрясения. По результатам интерпретации мониторинговых данных ЭТ показано, что на промышленные взрывы в угольных карьерах также имеется реакция в виде вариаций УЭС, которые составляют первые единицы процентов, при этом превышают погрешности подбора геоэлектрических моделей в 1,5–2 раза. Кроме того, были выполнены измерения в интервал времени, когда не было зарегистрировано ни землетрясений, ни взрывов, и в этот интервал вариации УЭС были на уровне погрешности подбора моделей. Можно сделать вывод, что на участке исследования другие факторы (кроме землетрясений и взрывов) слабо влияют на получаемые данные, и, возможно, отличать взрывы от землетрясений (рис. 5).

Следует отметить, что события, зафиксированные вне добывающих карьеров, практически мало влияли на геоэлектрические параметры, которые изменились незначительно. Сейсмологи предполагают, что слабые техногенные события, эпицентры которых наблюдаются за пределами угольных карьеров на разных расстояниях от участка мониторинга, могут быть афтершоками наиболее сильных землетрясений с магнитудами около 4-х и более.

Кроме оценок разностных вариаций УЭС, для анализа результатов мониторинга методом электротомографии был рассчитан параметр Dr , как среднеквадратическое значение набора данных разностного разреза по формуле:

$$Dr = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}},$$

где x_i – значение в каждой точке разностного разреза в процентах, n – количество значений.

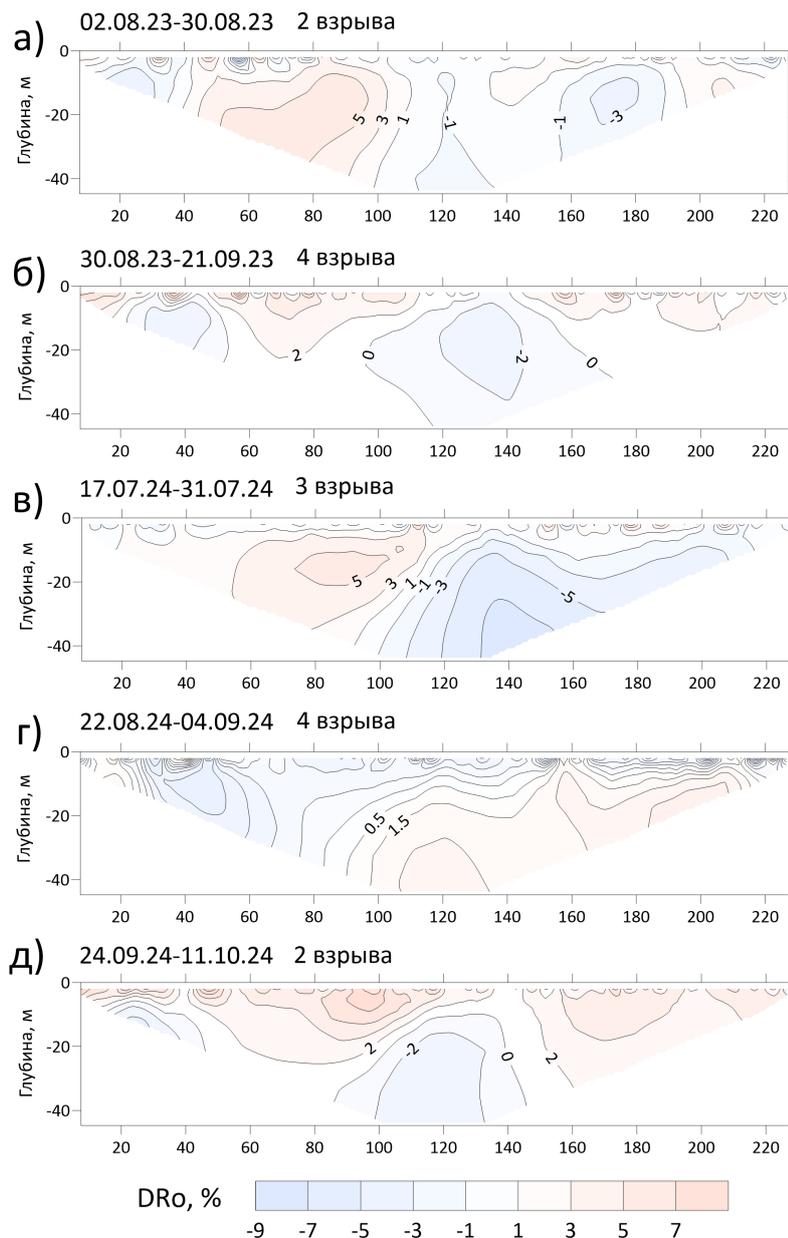


Рис. 5. Разностные разрезы, отражающие реакцию геологической среды на происходящие взрывы в угольных карьерах Горловской впадины.

Построенный временной ряд параметра Dr был сопоставлен с сейсмологическими данными (магнитудами, азимутальными углами на эпицентр землетрясений и взрывов) (рис. 6). Для землетрясений введена шкала величины магнитуды. На графике они показаны вертикальными столбиками красного цвета, сверху которых подписаны азимутальные углы направления на эпицентры. Для взрывов величина магнитуды отмечена вертикальными линиями. Из сопоставления видно, что для всех интервалов, в которые произошли землетрясения, отмечается возрастание параметра Dr , при этом для землетрясения большей магнитуды, либо более близких к установке наблюдения (с меньшим эпицентральной расстоянием), наклон графика Dr более крутой.

Вместе с тем, имеется исключение для периода измерений. Например, на землетрясение 26 сентября 2023 г. с магнитудой 3,1 и эпицентральной расстоянием в 14 км было выявлено отсутствие реакции параметра Dr . Это можно объяснить отчасти большей его удалённостью от пункта измерений по сравнению с остальными. Кроме того, азимут на эпицентр у него составляет 37° , в то время как все остальные землетрясения, на

которые наблюдаются значимые вариации УЭС, происходят по азимутам в диапазоне 220° – 325° , т. е. на северо-запад и юго-запад. Таким образом отсутствие отклика на это землетрясение может быть связано с недостаточной азимутальной чувствительностью установки мониторинга в северо-восточном направлении.

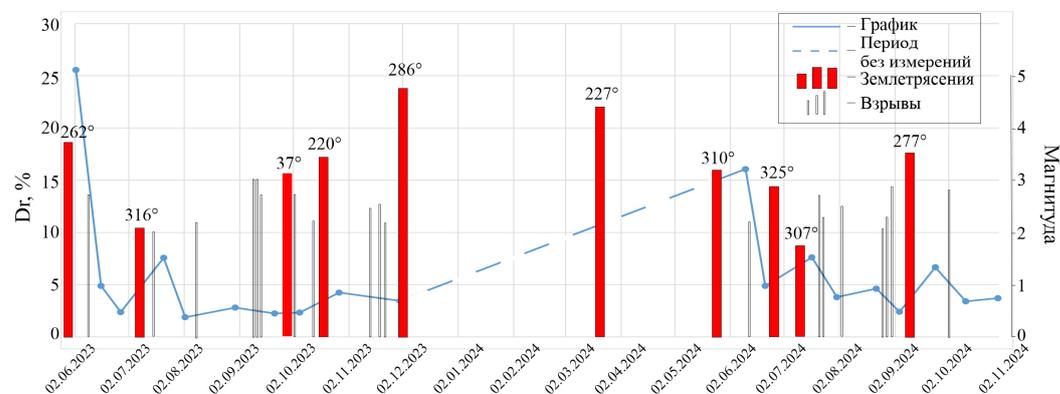


Рис. 6. График временных изменений параметра Dr в сопоставлении с сейсмологическими характеристиками землетрясений и взрывов.

Заклучение

Полевой эксперимент в районе сейсмической активизации Горловского прогиба, включая зону регионального разлома, отделяющего прогиб от Салаира на юго-востоке, выполнялся в течение двух лет. Регулярные измерения проводились методом электротомографии, для которого параллельно было разработано программное обеспечение интерпретации мониторинговых данных. Накопленные в результате эксперимента материалы электроразведки и сейсмологии позволяют сопоставить возможности двух геофизических методов и далее более эффективно разрабатывать подходы к решению сложной и важной проблемы выявления критериев сейсмической активизации с признаками техногенной составляющей в Горловском прогибе.

Из рассмотрения сейсмологических данных следует, что эпицентры землетрясений в основном приурочены к зонам действующих угольных карьеров (рис. 1). Эти события происходили с разными магнитудами, азимутальными углами и расстояниями от центральной точки профиля наблюдений до эпицентра. По результатам обработки и интерпретации полевых данных ЭТ были определены вариации УЭС как результат воздействия землетрясений на среду участка исследования. В большинстве случаев вариации достигают десятки процентов, причём установлено, что их величины зависят от магнитуды событий, увеличиваясь при её возрастании. Вместе с тем, имеются исключения, например, на землетрясение №3 в 2023 г. (табл. 1), эпицентр которого находится на территории Салаирского антиклинория, нет реакции в данных ЭТ. Его параметры отличаются от остальных максимальным эпицентральной расстоянием в 14 км и азимутальным углом в 37° (для событий в зонах угледобывающих карьеров углы составляют 220° – 325°). Учитывая предшествующие мониторинговые исследования методами электроразведки в других сейсмоопасных регионах, можно сделать предварительный вывод о возможной азимутальной чувствительности системы наблюдений ЭТ в районе исследования.

Совместный анализ материалов сейсмологии и электротомографии показал, что на промышленные взрывы непосредственно в угольных карьерах также имеется реакция в виде вариаций УЭС, но они небольшие и составляют первые единицы процентов, что позволяет отличать по данным ЭТ взрывы от землетрясений. Это важно также для того, чтобы определить влияют ли взрывы на усиление сейсмической активности, возможно периодически являясь триггерами последующего землетрясения, добавляя техногенную составляющую в сейсмичность на территории Горловской впадины.

В сейсмологии для разделения землетрясений и взрывов единственным надёжным критерием является спектральный анализ сейсмограмм [КоФ ФИЦ ЕГС РАН, 2025]. Частотный состав записей сейсмических событий, особенно естественного происхождения, сильно изменчив во времени и спектры событий сами по себе не очень информативны, поэтому привлекают спектральные диаграммы – изменения спектра событий во времени. Здесь следует отметить, что проводится визуальный анализ (например, наличие «полос» на диаграмме при взрывах). В настоящее время осуществляются попытки ввести количественные оценки для выявления различий спектральных диаграмм землетрясений и взрывов, но результаты пока ещё далеки от совершенства [Добрынина и др., 2022; Abdalzaher et al., 2024; Hounq, 2017; Kim et al., 2020; Korrat et al., 2022]. Поэтому дополнительные способы идентификации и отличия указанных событий, в частности, с помощью одного из методов электроразведки – электротомографии безусловно являются актуальными.

Для того чтобы представить более наглядно результаты электротомографии и получить ещё одну количественную оценку реакции электрических измерений на сейсмические события, был рассчитан параметр Dr . Сопоставление этого параметра с характеристиками землетрясений и взрывов показало, что реакция на техногенные взрывы в угольных карьерах соответствует уменьшению значения этого параметра по сравнению с землетрясениями. То есть по амплитуде изменений Dr также можно оценить какие конкретно сейсмические события произошли – землетрясение или серия взрывов. Таким образом, введённый для дополнительной количественной оценки результатов мониторинга параметр Dr можно предварительно отнести к одному из критериев сейсмических активизаций на территории Горловской впадины.

Выполненные мониторинговые измерения методом электротомографии, их интерпретация, анализ результатов позволяют сделать некоторые выводы об эффективности таких работ. Авторы считают, что исследования следует продолжать в сторону совершенствования как методики наблюдений, так и интерпретации данных. Планируется и далее развивать программные средства мониторинга. В частности, будет добавлен расчёт функции чувствительности.

Очевидна также необходимость увеличения объёма наблюдений. С одной стороны, нужны более длительные наблюдения, а с другой – измерения с меньшим интервалом по времени [Comina et al., 2019]. Оптимальным образом это достигается обустройством стационарного пункта наблюдения с возможностью удалённого контроля и передачи данных. В таком случае возможен долгосрочный сбор данных с относительно высокой плотностью и оперативным анализом (например, еженедельная или ежедневная регистрация в течении года). В ближайшей перспективе рассматривается вариант обустройства стационарной системы наблюдения для исследования среды на глубину до 50–70 м на территории Обсерватории «Ключи» ИНГГ СО РАН. Планируется подключение системы наблюдения к контрольно-измерительному блоку, размещённому в одном из зданий обсерватории и оснащённому удалённым терминалом управления. Это обеспечит удалённое управление, контроль и сбор данных ЭТ по сети интернет с любого внешнего ПК, на котором установлено соответствующее ПО.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований №FWZZ-2026-0049 и гранта Российского научного фонда №23-27-10050.

Список литературы

- Гладышев Е. А., Еманов А. Ф., Еманов А. А. и др. Природная и техногенная сейсмичность Новосибирской области // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2024. – Т. 2, № 2. – С. 49–54. – <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2024-2-2-49-54>.
- Добрынина А. А., Герман В. И. и Саньков В. А. Распознавание промышленных взрывов и слабых природных землетрясений // Уголь. – 2022. – S12. – С. 23–29. – <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-s12-23-29>.
- Еманов А. Ф., Еманов А. А., Павленко О. В. и др. Кольванское 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. – С. 29–45. – <https://doi.org/10.21455/vis2019.4-2>.

- 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. — <https://doi.org/10.15372/fpvgn2021080132>.
- Заявка №2024686847. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. ERT monitoring / А. В. Мариненко, А. Е. Шалагинов, Н. Н. Неведрова и др. ; правообладатель ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А.Трофимука СО РАН. — № RU 2024687139 ; заявл. 11.11.2024 ; опубли. 14.11.2024, Бюл. №11 (Рос. Федерация).
- 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. — <https://doi.org/10.15372/ftprpi20210402>.
- КоФ ФИЦ ЕГС РАН. Сейсмический и инфразвуковой мониторинг Северо-Запада России и прилегающих территорий, а также архипелага Шпицберген. — 2025. — URL: <http://krsc.ru>.
- Неведрова Н. Н., Шалагинов А. Е., Шапаренко И. О. и др. Строение и мониторинг в зоне сейсмической активизации Горловской впадины Алтае-Саянской складчатой области по данным электротомографии // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2024. — № 5. — ES5003. — <https://doi.org/10.2205/2024es000947>.
- Неведрова Н. Н. и Эпов М. И. Анализ результатов электромагнитного мониторинга на Байкальском прогностическом полигоне // *Вестник НЯЦ РК*. — 2004. — № 2. — С. 143–149.
- Неведрова Н. Н., Эпов М. И. и Дашевский Ю. А. Определение структуры массива горных пород и результаты активного электромагнитного мониторинга на Байкальском прогностическом полигоне // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2004. — № 3. — С. 29–44.
- Рязанцев П. А., Нилова М. В. и Белохвостик Д. М. Мониторинг миграции нефтепродукта в лабораторных условиях с использованием метода электротомографии // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. — 2017. — № 6. — С. 83–94.
- Санчаа А. М., Неведрова Н. Н., Бабушкин С. М. и др. Первые результаты исследований Горловской впадины наземными методами электроразведки с контролируруемыми источниками // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. — 2021. — Т. 2, № 2. — С. 272–279. — <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2021-2-2-272-279>.
- ФИЦ ЕГС РАН. Информация Службы срочных донесений (ССД). — 1993. — URL: <http://www.gsras.ru/new/ssd.htm> (дата обр. 15.06.2025).
- Шалагинов А. Е., Неведрова Н. Н. и Бабушкин С. М. Геоэлектрическое строение разломного ограничения Горловского прогиба Новосибирской области по данным нестационарных электромагнитных зондирований // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. — 2023. — Т. 2, № 4. — С. 61–67. — <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2023-2-4-61-67>.
- Abdalzaher M. S., Krichen M. and Fouda M. M. Enhancing earthquakes and quarry blasts discrimination using machine learning based on three seismic parameters // *Ain Shams Engineering Journal*. — 2024. — Vol. 15, no. 9. — P. 102925. — <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102925>.
- Comina C., Giordano N., Ghidone G., et al. Time-Lapse 3D Electric Tomography for Short-time Monitoring of an Experimental Heat Storage System // *Geosciences*. — 2019. — Vol. 9, no. 4. — P. 167. — <https://doi.org/10.3390/geosciences9040167>.
- Houng S. E. Discrimination between Natural Earthquakes and Explosions Based on the Azimuthal Distribution of S/P Amplitude Ratios // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2017. — Vol. 108, no. 1. — P. 218–229. — <https://doi.org/10.1785/0120160322>.
- Kim S., Lee K. and You K. Seismic Discrimination between Earthquakes and Explosions Using Support Vector Machine // *Sensors*. — 2020. — Vol. 20, no. 7. — P. 1879. — <https://doi.org/10.3390/s20071879>.
- Korrat I. M., Lethy A., ElGabry M. N., et al. Discrimination Between Small Earthquakes and Quarry Blasts in Egypt Using Spectral Source Characteristics // *Pure and Applied Geophysics*. — 2022. — Vol. 179, no. 2. — P. 599–618. — <https://doi.org/10.1007/s00024-022-02953-w>.

RESULTS OF REGULAR OBSERVATIONS BY THE METHOD OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY IN THE GORLOVSKAYA DEPRESSION OF THE ALTAI-SAYAN FOLDED REGION

A. E. Shalaginov^{**1}, N. N. Nevedrova¹, I. O. Shaparenko¹, and E. V. Balkov¹

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

****Correspondence to:** Alexander Shalaginov, shalaginovae@ipgg.sbras.ru

The article presents the results of a study of seismic activity in the Gorlovskaya Depression (Novosibirsk Region) using the electrical resistivity tomography method, where since 2017 there has been an increase in the number of earthquakes with magnitudes up to $M = 4.7$ associated with intensive open-pit coal mining. The purpose of the study is to determine the criteria for the manifestation of natural and natural-technogenic hazardous processes based on the analysis of data from one of the ground-based electrical exploration methods – electrical resistivity tomography. From the analysis of electrical resistivity tomography data obtained as a result of regular observations in 2023–2024, significant variations in the electrical resistivity in fault zones after seismic events were revealed, the azimuthal dependence of electrical resistivity variations on the direction to the earthquake epicenter was established. To quantitatively assess the difference sections, the parameter Dr was calculated, showing the dependence on magnitude and epicentral distance.

Keywords: Gorlovskaya depression, seismic activity, geophysical monitoring, electrical resistivity tomography, electrical resistivity variations, inversion.

Citation: Shalaginov A. E., Nevedrova N. N., Shaparenko I. O., and Balkov E. V. (2026), Results of Regular Observations by the Method of Electrical Resistivity Tomography in the Gorlovskaya Depression of the Altai-Sayan Folded Region, *Russian Journal of Earth Sciences*, 26, ES1007, <https://doi.org/10.2205/2026ES001056>, EDN: MWADVP

Received: May 27, 2025

Accepted: September 4, 2025

Published: March 16, 2026



© 2025. The Authors.

References

- Abdalzaher M. S., Krichen M. and Fouda M. M. Enhancing earthquakes and quarry blasts discrimination using machine learning based on three seismic parameters // *Ain Shams Engineering Journal*. — 2024. — Vol. 15, no. 9. — P. 102925. — <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102925>.
- Application №2024686847. Certificate of state registration of the computer program. ERT monitoring / A. V. Marinenko, A. E. Shalaginov, N. N. Nevedrova, et al. ; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS. — No. RU 2024687139 ; 11/11/2024 ; 11/14/2024, Bull. №11. — (In Russian).
- Comina C., Giordano N., Ghidone G., et al. Time-Lapse 3D Electric Tomography for Short-time Monitoring of an Experimental Heat Storage System // *Geosciences*. — 2019. — Vol. 9, no. 4. — P. 167. — <https://doi.org/10.3390/geosciences9040167>.
- Dobrynina A. A., German V. I. and Sankov V. A. Discrimination of weak natural earthquakes and industrial explosions // *Ugol'*. — 2022. — S12. — P. 23–29. — <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-s12-23-29>. — (In Russian).
- Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., et al. Technogenic seismic activation in Gorlovsky coal basin area // *Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy gornykh nauk*. — 2021. — Vol. 8, no. 1. — P. 207–210. — <https://doi.org/10.15372/fpvgn2021080132>. — (In Russian).
- Emanov A. F., Emanov A. A., Pavlenko O. V., et al. Kolyvan earthquake 09.01.2019 with $ML = 4.3$ and features of induced seismicity in the conditions of the Gorlovsky coal basin // *Problems of Engineering Seismology*. — 2019. — Vol. 46, no. 4. — P. 29–45. — <https://doi.org/10.21455/vis2019.4-2>. — (In Russian).
- Gladyshev E. A., Emanov A. F., Emanov A. A., et al. Natural and technogenic seismicity in the Novosibirsk region // *Interexpo GEO-Siberia*. — 2024. — Vol. 2, no. 2. — P. 49–54. — <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2024-2-2-49-54>. — (In Russian).

- GS RAS. Last Earthquake (by Alert Service). — 1993. — URL: <http://www.gsras.ru/new/ssd.htm> (visited on 06/15/2025).
- Houng S.E. Discrimination between Natural Earthquakes and Explosions Based on the Azimuthal Distribution of S/P Amplitude Ratios // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2017. — Vol. 108, no. 1. — P. 218–229. — <https://doi.org/10.1785/0120160322>.
- Kim S., Lee K. and You K. Seismic Discrimination between Earthquakes and Explosions Using Support Vector Machine // Sensors. — 2020. — Vol. 20, no. 7. — P. 1879. — <https://doi.org/10.3390/s20071879>.
- 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. — <https://doi.org/10.1134/s1062739121040025>.
- Korrat I. M., Lethy A., ElGabry M. N., et al. Discrimination Between Small Earthquakes and Quarry Blasts in Egypt Using Spectral Source Characteristics // Pure and Applied Geophysics. — 2022. — Vol. 179, no. 2. — P. 599–618. — <https://doi.org/10.1007/s00024-022-02953-w>.
- KSC GS RAS. Seismic and infrasonic monitoring of Northwestern Russia and adjacent territories, as well as the Spitsbergen archipelago. — 2025. — URL: <http://krsc.ru>.
- Nevedrova N. N. and Epov M. I. Analysis of electromagnetic monitoring results at Baikal prognostic test-site // NNC RK Bulletin. — 2004. — No. 2. — P. 143–149. — (In Russian).
- Nevedrova N. N., Epov M. I. and Dashevskii Yu. A. Determination of rock mass structure and results of active electromagnetic monitoring on the Baikal prognostic proving ground // Journal of Mining Science. — 2004. — Vol. 40, no. 3. — P. 244–258. — <https://doi.org/10.1007/s10913-005-0004-5>.
- Nevedrova N. N., Shalaginov A. E., Shaparenko I. O., et al. 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. — 2024. — No. 5. — ES5003. — <https://doi.org/10.2205/2024es000947>. — (In Russian).
- Ryazantsev P. A., Nilova M. V. and Belokhvostik D. M. Monitoring of oil product migration in the laboratory using electrical resistivity tomography // Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. — 2017. — No. 6. — P. 83–94. — (In Russian).
- 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. — <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2021-2-2-272-279>. — (In Russian).
- Shalaginov A. E., Nevedrova N. N. and 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. — P. 61–67. — <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2023-2-4-61-67>. — (In Russian).