

УДК 550.3

Строение Горловской впадины в зоне современной сейсмической активизации по данным зондирований становлением электромагнитного поля

© 2026 г. Н.Н. Неведрова¹, С.М. Бабушкин², А.М. Санчаа¹

¹ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 29.05.2026 г.

Аннотация. Горловская впадина Новосибирской области, расположенная между Колывань-Томской складчатой зоной и северо-западным Салаирским антиклинорием, отделена от них региональными разломами. Она характеризуется высокой напряжённостью тектонических деформаций и крупнейшими в России запасами антрацита. Начиная с 2019 г., по сейсмологическим данным во впадине наблюдается значительное усиление сейсмической активности, связанной не только с природными процессами, но и с техногенными воздействиями. Землетрясения концентрируются в зоне действующих угольных карьеров в северной части впадины. Далее сейсмичность может развиваться как опасный для инфраструктуры и населения процесс, за которым необходимо наблюдать. Для регулярных наблюдений методами геоэлектрики важно выявить строение участка сейсмической активизации и выделить разломные структуры, которые можно отнести к сейсмогенерирующим. На геоэлектрических разрезах активные разломы обычно выделяются зоной пониженных удельных электрических сопротивлений. Для этого исследования привлечены полевые данные зондирований становлением электромагнитного поля в ближней зоне (ЗСБ) по профилям в северной части впадины, где сосредоточены эпицентры землетрясений и места промышленных взрывов в карьерах. Полученные в результате интерпретации геоэлектрические модели позволяют уточнить строение впадины и выявить участки с разломными нарушениями, на которых оптимально наблюдать за развивающейся сейсмичностью методами геоэлектрики.

Ключевые слова: Горловская впадина, техногенная сейсмичность, зондирования становлением электромагнитного поля, ЗСБ, разломные структуры.

Для цитирования: Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М., Санчаа А.М. Строение Горловской впадины в зоне современной сейсмической активизации по данным зондирований становлением электромагнитного поля // Российский сейсмологический журнал. — 2026. — Т. 8, № 3. — С. 58–70. — DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.3.04>. — EDN: NAYBYJ

Введение

Горловская впадина находится в восточной части Новосибирской области между двумя крупными тектоническими структурами — Колывань-Томской складчатой зоной и Салаирским антиклинорием. Она вытянута в северо-восточном направлении вдоль правобережья р. Оби и Обского водохранилища более чем на 120 км при небольшой ширине (в среднем 8–15 км). Строение впадины характеризуется чередованием антиклинальных и синклинальных складок с присутствием разнонаправленных разломов. По геологическим данным, по простиранию она ограничена с двух сторон системой региональных дизъюнктивов и надвинута на структуры

Салаира, от которого её отделяют с юго-востока на разных участках Чемской, Доронинский и Кемеровский разломы [Геологическая ..., 2014].

В Горловском прогибе отложилось большое количество органогенных осадочных пород, таких как известняки, мрамор, каменный уголь. В верхней части разреза преобладает угленосная моласса карбон-раннепермского возраста, а средняя и нижняя части представлены дислоцированными континентальными и морскими отложениями перми. В результате метаморфизма пермских углей этот бассейн вмещает крупнейшие в России месторождения антрацита, которые начали разрабатывать ещё в начале прошлого столетия в карьерах и шахтах [Котельников и др., 2015; Иванов и др., 1999]. В настоящее

время продолжается интенсивная разработка целого ряда угольных карьеров, включая расположенные на севере впадины — Колыванский и Восточный, в зоне которых в последние годы концентрируются землетрясения магнитудой более 4.

Гидрогеологические характеристики являются важными для интерпретации и анализа геофизических данных. В Горловской впадине выделяются два водоносных комплекса — мезозойско-кайнозойских отложений и зоны трещиноватости домезозойских образований, которые играют основную роль. Первый комплекс связан в основном с покровным кайнозойским чехлом, мощность которого колеблется от 50 до 150 м, и объединяет грунтовые и слабонапорные воды преимущественно четвертичных отложений. Питание подземных вод первых от поверхности водоносных горизонтов происходит за счёт инфильтрации атмосферных осадков и таяния снега. Нижезалегающие подземные воды неогеновых отложений питаются за счёт 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. Водоносные горизонты трещиноватых зон питаются как за счёт вертикальной фильтрации, так и за счёт подтока с юго-восточных соседних областей Салаирского антиклинория [Котельников и др., 2015]. Длительное интенсивное воздействие природных и техногенных источников приводит к изменениям геодинамических и гидрогеологических режимов территории, влияющих на геофизические и, в том числе, на электромагнитные поля.

Специалистами Алтае-Саянского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (АСФ ФИЦ ЕГС РАН) на территории впадины до 2017 г. фиксировались только единичные землетрясения с магнитудами M_L не более 3.5. Значительное усиление сейсмической активности на севере впадины начало происходить после Колыванского землетрясения 2019 г. с магнитудой $M_L=4.3$, и далее интенсивность событий только возрастает [Emanov et al., 2020]. Сейсмологи полагают, что это связано не только с природными процессами, но и с техногенными воздействиями на геологическую среду: промышленными взрывами в угольных карьерах, перемещениями значительных объёмов извлекаемой горной породы, изменением рельефа при наличии тектонических напряжений. Сейсмологи отмечают, что даже относительно

небольшие магнитуды приповерхностных землетрясений компенсируются близостью их очагов к поверхности. Они могут быть опасны для населения, промышленной и жилой инфраструктуры, вызывая локальные катастрофы. Глубины гипоцентров происходящих событий относительно небольшие, более 90% очагов зафиксированы не глубже 8 км с характерным механизмом — взброс. Пространственно они приурочены к районам наиболее интенсивной добычи угля открытым способом. Отличительной особенностью этого сейсмического процесса является нехватка землетрясений малых энергий, и для соблюдения закона Гутенберга-Рихтера их явно недостаточно [Еманов и др., 2021].

Таким образом, по сейсмологическим наблюдениям, сейсмическая активность в северной части впадины усиливается с каждым годом уже в течение 6 лет. Максимальная магнитуда землетрясений зафиксирована на уровне 4.7. При расчёте по методике, предложенной Н.В. Шебалиным, интенсивность сотрясений от очага такого землетрясения с глубины 8 км в эпицентре составит порядка 7 баллов [Шебалин, 1961]. Такие землетрясения приводят, например, к оползням в карьерах, падению тяжёлых предметов в промышленных и жилых помещениях, трещинам в фундаментах зданий. Зона сейсмической активизации впадины расположена примерно в 60 км от г. Новосибирска, в 30 км от Научного центра «Академгородок» и Сибирского источника синхротронного излучения поколения 4+ (СКИФ). На этой территории, кроме интенсивной добычи угля открытым способом, находятся промышленные предприятия, города и посёлки, которые могут пострадать при дальнейшем увеличении магнитуд. В связи с этим были развёрнуты регулярные сейсмологические наблюдения. Данные собираются с использованием сетей широкополосных цифровых станций для регистрации как природных тектонических, так и техногенных событий (взрывов в карьерах) [Еманов и др., 2021].

Строение Горловской впадины, как глубинное, так и приповерхностное, ранее было изучено недостаточно. Работы методами сейсмoeлектроразведки проводились в основном в 70–80-е гг. прошлого столетия на территории отдельных угольных месторождений. В настоящее время проведены полевые работы и опубликованы результаты с использованием методов инженерной сейсмoeлектроразведки на Дорогинском месторождении по Шадринскому профилю для уточнения складчатой структуры угольных пластов до глубин примерно 150 м [Канарейкин и др., 2023; Полянский и др., 2025].

В 2020 г. были начаты опытно-методические полевые работы в районе вышеперечисленных карьеров с использованием комплекса разноглубинных методов электроразведки с контролируемыми источниками, включающие вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) и электротомографию (ЭТ), зондирования становлением электромагнитного поля в ближней зоне (ЗСБ) для определения приповерхностного и глубинного строения по профилю в северной части впадины. Первые результаты были опубликованы в 2021 году [Санчаа и др., 2021а]. Эти работы были продолжены и в последующие годы, включая 2025 год. Кроме этого, в 2023–2024 гг. проводились регулярные наблюдения методом электротомографии. Анализ результатов показал, что получены значимые вариации удельного электрического сопротивления (УЭС) как отклик на землетрясения, при этом величина вариаций УЭС напрямую зависела от магнитуды события, при увеличении которой возрастают и вариации. Влияло направление на эпицентры событий относительно пункта измерений, т.е. величина азимутального угла [Неведрова и др., 2024; Шалагинов и др., 2026].

В настоящее время актуально продолжение современных исследований электромагнитными методами. В частности, привлечение метода ЗСБ позволяет получить характеристики разреза в широком диапазоне глубин и с необходимой детальностью изучить строение в зонах разломов за счёт сгущения сети наблюдений. Именно в разломных зонах оптимально выполнять мониторинг, так как при подготовке землетрясений в них наблюдаются максимальные изменения УЭС. С помощью аппаратных разработок метода ЗСБ процесс становления регистрируют от 0.00001 до 0.1 с и измеряют сигналы с минимальной амплитудой 0.2–0.5 мкВ, при этих параметрах глубинность исследования достигает нескольких сотен метров в геоэлектрических условиях Горловской впадины, конечно, в зависимости от значений УЭС горных пород и размеров использованных установок [Бабушкин и др., 2021].

Цель исследования — получение новых данных о строении зоны сейсмической активизации Горловской впадины методом ЗСБ. В задачи входит: 1) построение геоэлектрических разрезов по выбранным профилям на участке исследования; 2) выявление на основе детальной съёмки в зонах разломов их структурных особенностей и степени активности, руководствуясь значениями УЭС; 3) выбор участка регулярных наблюдений.

Методика полевых измерений и подходы к интерпретации данных ЗСБ

Исследования комплексом методов наземной электроразведки с контролируемыми источниками (ЗСБ, ВЭЗ, ЭТ) на территории Горловской впадины были продолжены в 2021–2025 гг. в северной части впадины в зоне расположения нескольких крупных угледобывающих карьеров и концентрации сейсмических событий. В качестве основного метода для восстановления глубинного строения использован метод ЗСБ. В целях построения более детальных моделей самой верхней части разреза в зонах разломов до глубин 40–100 м привлечены электротомография и ВЭЗ. В 2021 г. по данным ЗСБ были получены первые результаты строения по профилю, который пересекал разломную структуру юго-восточного борта Горловского прогиба. Эти результаты показали, что зона разлома хорошо выделяется в разрезе понижением значений удельного электрического сопротивления [Шалагинов и др., 2023].

В последующие годы (2022–2025) полевые работы методами геоэлектрики выполнялись по профилям, пересекающим впадину с северо-запада на юго-восток. В настоящее время пройдено три профиля ЗСБ разной длины через территорию впадины и разломы, выделенные по геологическим данным, отделяющие её как от Колывань-Томской зоны на северо-западе, так и от Салаирского антиклинория на северо-востоке. В зонах разломов по возможности выполнена более детальная съёмка. Таким образом, в настоящее время получен достаточный объём полевых данных метода, чтобы судить о его эффективности в геоэлектрических условиях Горловской впадины. На схеме фактического материала показаны профили и пункты измерений, а также основные разломные структуры, пересекающие и ограничивающие впадину (рис. 1).

Интерпретация данных ЗСБ. Для интерпретации был привлечён весь объём полевых данных, полученных с соосными и разнесёнными установками, а также имеющиеся априорные материалы. В частности, по геологическим данным известно, что в осадочном заполнении впадины присутствуют отложения верхнего девона, карбона, перми, перекрытые мощной корой выветривания мел-палеогенового возраста, а также рыхлыми отложениями неогенового и четвертичного возрастов. По указанному литологическому составу горных пород можно предварительно судить о значениях удельного электрического сопротивления отдельных стратиграфических комплексов [Геологическая ..., 2014].

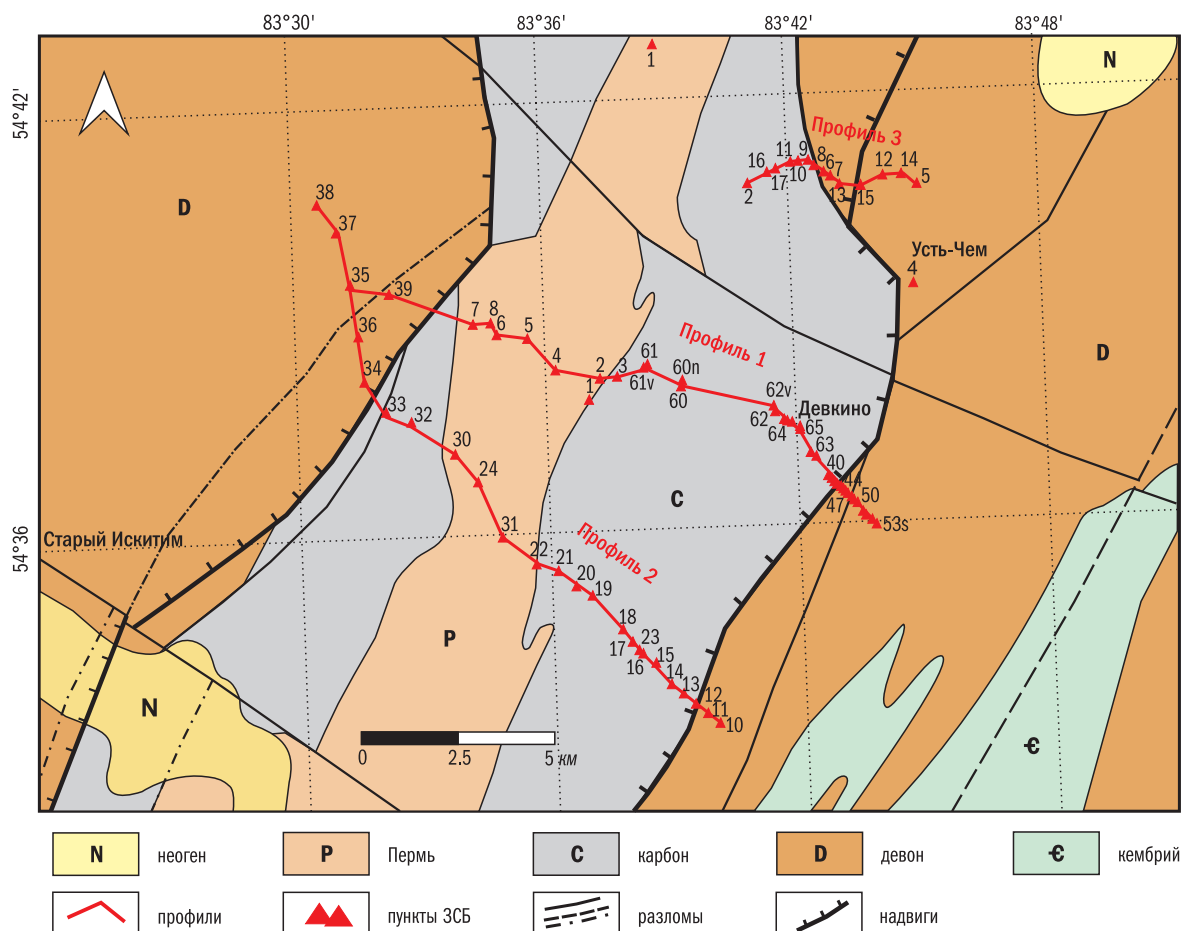


Рис. 1. Схема фактического материала: профили и пункты ЗСБ; основные стратиграфические комплексы, разломные структуры

Локальные участки измерений в зонах разломов находятся на территории впадины, примыкающей к Салаирскому антиклинорию, и частично непосредственно на его структурах, характеризующихся мелкопочечным рельефом. Четвертичные алевритоглинистые отложения перекрывают большую часть этих участков, поэтому разломные границы Горловской впадины с Салаирским антиклинорием чаще всего визуально не просматриваются. Вместе с тем, при измерениях южнее пос. Легостаево, где выполнен профиль 3 со сложным рельефом и отсутствием четвертичных и неогеновых отложений на дневной поверхности на территории Салаирского антиклинория, разломы можно проследить в рельефе, так как породы палеозойского фундамента здесь частично выходят на дневную поверхность. В данном случае имеются достоверные данные о положении разломов на местности.

Обработка и интерпретация полевых данных осуществлялась с помощью двух программных комплексов моделирования и инверсии EMS и ZondTEM1D [Хабинов и др., 2010; ZondTEM1D,

2025]. Предварительный анализ кривых кажущегося удельного сопротивления $\rho_t(t)$ подтвердил правильность выбранных размеров установок и значений тока.

Для оценки качества полевых данных рассмотрена одна из характерных кривых ρ_t , полученная непосредственно над угленосным месторождением в пикете 6 профиля 1 (ЗСБ 6), и геоэлектрическая модель в результате инверсии (рис. 2а). В этом случае у кривой ρ_t нет восходящей ветви, так как зондирование находится над разрезом с очень большой мощностью низкоомных отложений (более 300 м), что ограничивает глубинность метода. В частности, в модели для ЗСБ 6 общая мощность слоёв разреза, отнесённых к залежам антрацита (3-й, 4-й и 5-й слои), определена в 345 м, а их удельное электрическое сопротивление соответственно составляет 2.1, 1.2 и 0.9 Ом·м. Примерно такие же значения УЭС получены при лабораторных измерениях образцов антрацита. Перекрывают угленосные слои осадочные отложения с достаточно низкими значениями УЭС в 28 Ом·м, но более

высокими по сравнению с антрацитом. Теоретическая кривая на рис. 2а показана сплошной линией красного цвета, а полевые данные — вертикальными штрихами. По рисунку можно судить, что практически во всем временном интервале погрешность подбора не превышает 5% (размер штриха), совсем небольшие искажения имеются на ранних временах.

Кривые ρ_{τ} , полученные в зонах отсутствия залежей антрацита, имеют явно выраженную правую восходящую ветвь, характеризующую выход на опорный высокоомный подстилающий горизонт, например, пикет 38 на профиле 2 (рис. 2б).

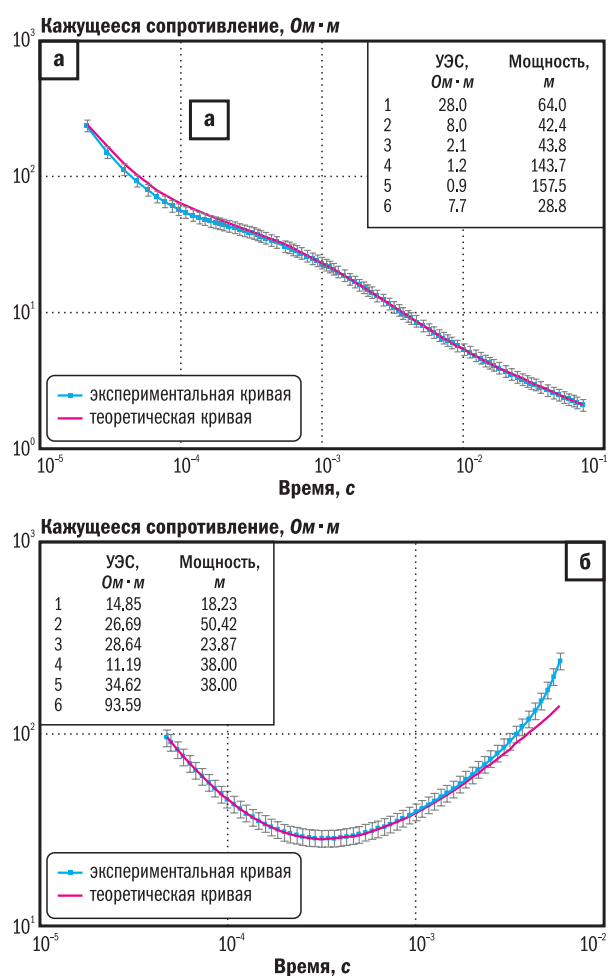


Рис. 2. Характерные кривые ЗСБ:
а — пикет 6 (профиль 1), б — пикет 38 (профиль 2)

В геоэлектрической модели для пикета 38 присутствуют три верхних низкоомных горизонта разной мощности, из которых два соответствуют четвертичным и неогеновым отложениям с УЭС соответственно 14.8 и 26.7 Ом·м, залегающим на коре выветривания с УЭС=28.6 Ом·м.

Ниже наблюдаются высокоомные слои девона. Большая часть подобранной синтетической кривой укладывается в 5-процентную погрешность, за исключением самых поздних времён, где погрешность начинает возрастать, что может свидетельствовать о присутствии неоднородности подстилающих слоёв или возможном влиянии вызванной поляризации. Эти факторы будут рассмотрены и учтены в дальнейших исследованиях.

Результаты интерпретации

Вначале рассмотрим наиболее значимые результаты интерпретации по профилю 1. На рис. 3 показан разрез в интервале пикетов ЗСБ 39–60. По данным, полученным на этом профиле в пунктах 7, 6, 5, 4, на глубинах от 50 до 100 м выделена кровля низкоомной толщи с аномально низкими значениями УЭС — около 1.0 Ом·м и мощностью, превышающей 350 м. Судя по значениям УЭС, в этом интервале профиля длиной более 2.5 км выделяются отложения, соответствующие залеганию нижнепермских пластов антрацита. Профиль 1 на этом участке проходит в нескольких сотнях метров на юг от крупного добывающего карьера «Восточный».

Так как все кривые ρ_{τ} над залежами антрацита не имеют правой восходящей ветви, полную мощность отложений на этом участке определить нельзя, нужно увеличивать размеры установок. Тем не менее, если руководствоваться удельным сопротивлением антрацита в 1 Ом·м, толщины залежи составляют около 300 м. Самый верхний горизонт, перекрывающий угольные отложения, состоит из двух слоёв, близких по УЭС с достаточно низкими значениями. По геологическим данным эти слои соответствуют рыхлым четвертичным и неогеновым отложениям, которые залегают на коре выветривания мел-палеогенового возраста с переменной мощностью от 20 м на юго-востоке до 70 м на северо-западе профиля и с УЭС, достигающим 28 Ом·м.

Конечно, из-за усиления сейсмической активности в Горловской впадине важно не только выделить на геоэлектрических разрезах разломы, но и определить, какие из них относятся к более активным. В предшествующих работах авторов методами электроразведки с контролируемыми источниками на территории Горного Алтая разломы отражаются зонами пониженных значений УЭС относительно вмещающих блоков [Неведрова et al., 2021; Санчаа и др., 2021б].

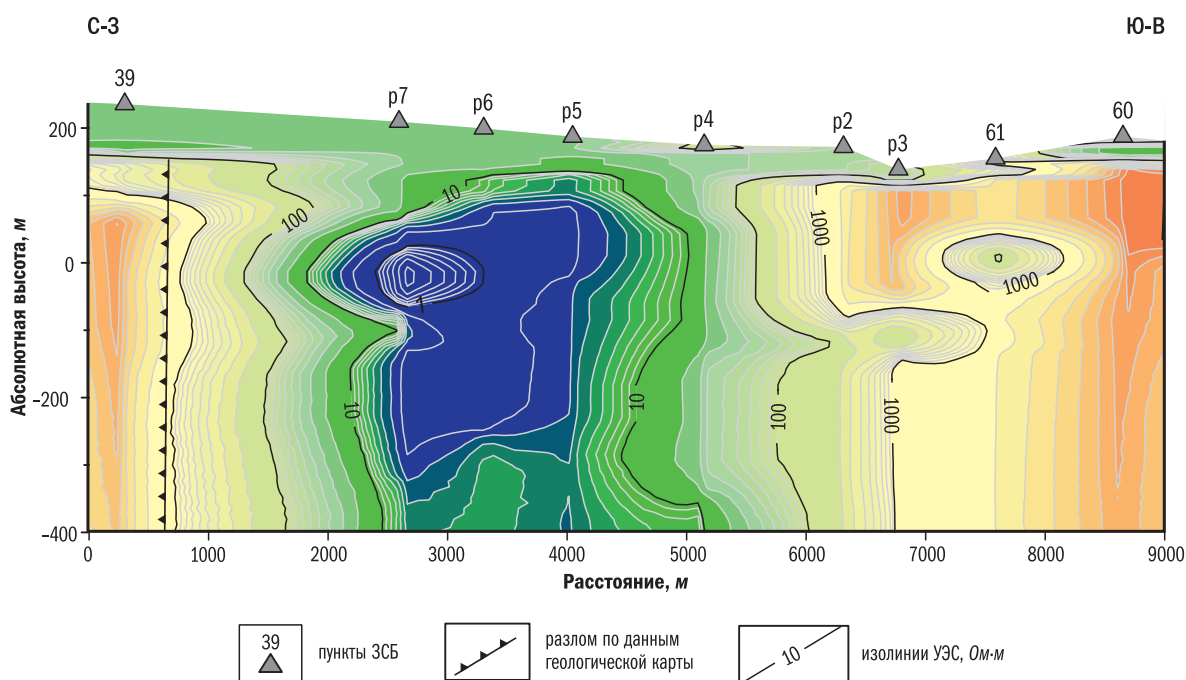


Рис. 3. Разрез по профилю 1 (пункты ЗСБ 39–60) в северной части Горловской впадины

По данным ЗСБ в Горловской впадине разломы на разрезах также выделяются понижением значений УЭС. При этом стоит отметить, что структурно они проявляются по-разному, например, в виде вертикальных блоков, надвигов или могут характеризоваться ещё более сложным строением. В частности, на разрезе по профилю 1 в его северо-западной части по более низким значениям УЭС выделена вертикальная зона, которая соответствует разлому, по геологическим данным ограничивающему впадину со стороны Колывань-Томской складчатой зоны. Разлом показан на геоэлектрическом разрезе сплошной линией с треугольными маркерами [Геологическая ..., 2014; Котельников и др., 2015].

Далее приведём разрезы по профилям, пересекающим на юго-востоке территорию впадины с выходом в Салаирский антиклинорий. Вначале рассмотрим район деревни Девкино, где профиль 1 в интервале пунктов ЗСБ 40v–53s пересекает разломный борт впадины. На всем протяжении профиля и непосредственно в зоне предполагаемого разлома была выполнена по возможности детальная съёмка (рис. 4). Измерения проводились соосными и разнесёнными установками. Размер генераторного контура составлял 100×100 м, приёмного – 50×50 м. Шаг между пунктами был относительно небольшим (в среднем около 100 м), но неравномерным из-за сложного рельефа дневной поверхности, особенно на территории антиклинория.

На рис. 4 черными вертикальными линиями с разной штриховкой отражено положение двух разломов в соответствии с геологической картой. Первый разлом показан в районе пикета 44 (сплошная линия с треугольными маркерами), а второй – около пикета 47 (здесь штрихпунктирная линия соответствует северо-западной границе зоны, выделенной по ЗСБ) [Геологическая ..., 2014; Котельников и др., 2015]. В распределении геоэлектрических параметров на разрезе разломная структура выделяется зоной понижения значений УЭС до 80 Ом·м очень сложной конфигурации до глубин ~350–400 м.

Если рассмотреть низкоомную зону по данным ЗСБ подробнее, то можно считать, что наблюдаются фактически два разлома, которые соединяются на глубине около 200 м проводящим субгоризонтальным слоем. Практически вертикальный разлом между соосными пунктами 47 и 48 соответствует геологическим данным. Далее на юго-восток на глубине ~200 м прослеживаются проводящие отложения (пункты 48–50s), которые переходят во вторую разломную структуру, её по геологической классификации можно отнести к надвигу. На схеме фактического материала эти два разлома показаны сплошными линиями (рис. 1). Авторы полагают, что по данным электроразведки положение разломов уточнено, а также выявлены их структурные особенности.

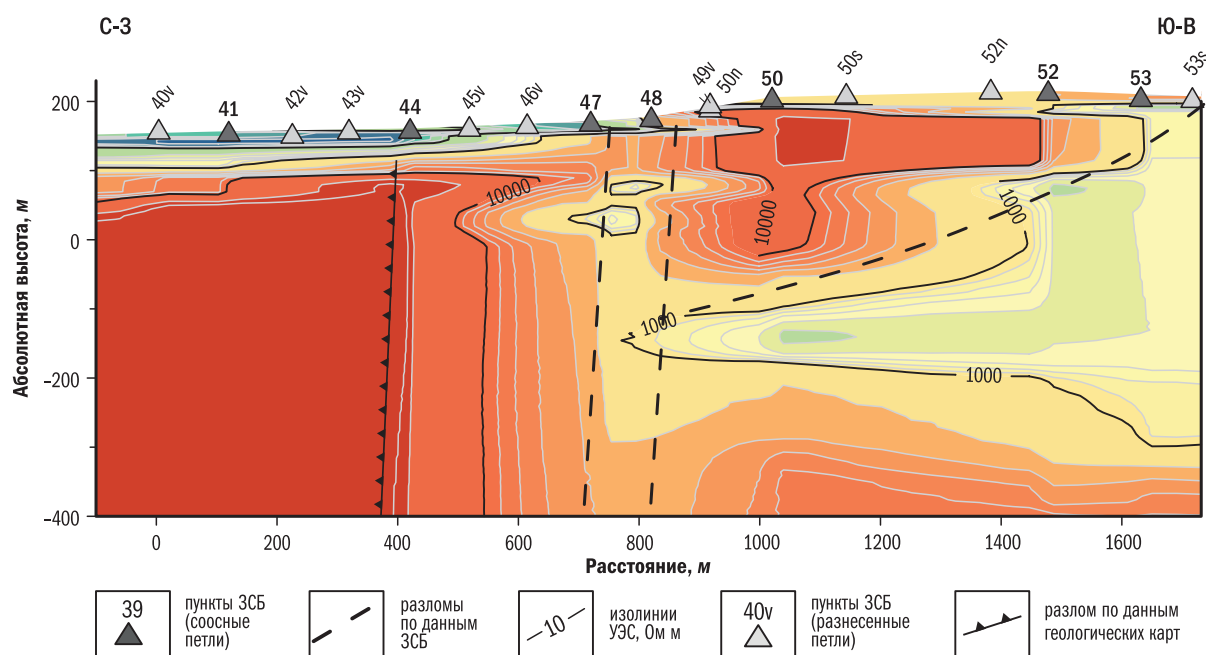


Рис. 4. Разрез по данным ЗСБ по профилю 1 (пункты 40v–53s) через юго-восточный борт Горловской впадины

Профиль 3 (рис. 5), проложенный по направлению пос. Усть-Чем — пос. Елбаши, выполнен в 2024 г. в нескольких километрах на восток от интенсивно разрабатываемых угольных карьеров (Колыванский, Восточный), вблизи которых концентрируются очаги землетрясения предположительно с техногенной сейсмичностью [Kishkina et al., 2021]. Профиль 3 также пересекает юго-восточные разломные ограничения впадины и выходит на территорию Салаирского антиклинория в районе пунктов 12, 14, 5. На этом профиле проведена детальная съёмка соосными и разнесёнными установками за исключением заболоченного интервала между пунктами 15–12. Всего выполнено 45 пунктов с размером генераторного контура 100×100 м и измерительного — 50×50 м. Разнос для разнесённой установки составлял 100 м. На профиле наблюдается необычный рельеф — существенное понижение высотных отметок при переходе от Горловской впадины на территорию антиклинория, который характеризуется мелкосопочным низкогорным рельефом и в основном приподнят относительно впадины.

На полученном геоэлектрическом разрезе по профилю 3 в его верхней части на юго-востоке в районе пунктов 12, 14 и 5 отсутствуют слои низкоомных четвертичных и неогеновые отложения. В распределении удельного электрического сопротивления на разрезе выделяются две зоны понижения УЭС до 300–900 Ом·м

относительно вмещающих блоков со значениями более 2000 Ом·м (рис. 5). Эти зоны в принципе соответствуют разломам, выделенным ранее по геологическим данным. На схеме рис. 1 видно, что профиль 3 пересекает две разломные структуры, ограничивающие впадину, причём одна из них обозначена более жирной линией, т.е. отнесена специалистами-геологами к региональному разлому [Геологическая ..., 2014]. Оба разлома — региональный и второстепенный — пересекаются южнее прохождения профиля 3. Анализируя результаты по этому профилю, можно отметить, что на этом участке отложения Салаирского антиклинория надвинуты на Горловскую впадину.

В заключение этого раздела рассмотрим северо-западный фрагмент профиля 2, который выполнен в южной части участка исследования. Он начинается в Колывань-Томской зоне, пресекает разломные структуры и выходит на территорию Горловской впадины. Измерения на профиле 2 проводились только соосными установками. Использовался генераторный контур квадратной формы со стороной, равной 200 м, и приёмный контур со стороной в 100 м. Интерпретация полевых данных ещё продолжается, но мы приведём здесь разрез в интервале пунктов 38–31, характеризующий как разломы, на участке ограничивающие впадину со стороны Колывань-Томской складчатой зоны, так и отложения впадины (рис. 6).

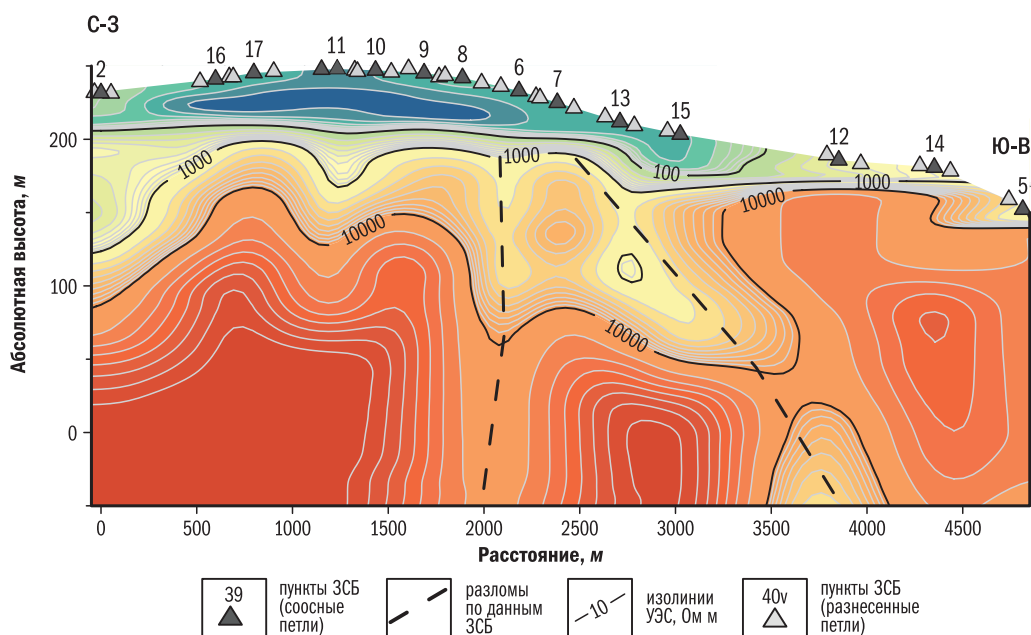


Рис. 5. Разрез по профилю 3 по данным ЗСБ.

Подписаны номера соосных установок, разнесённые показаны белыми треугольниками

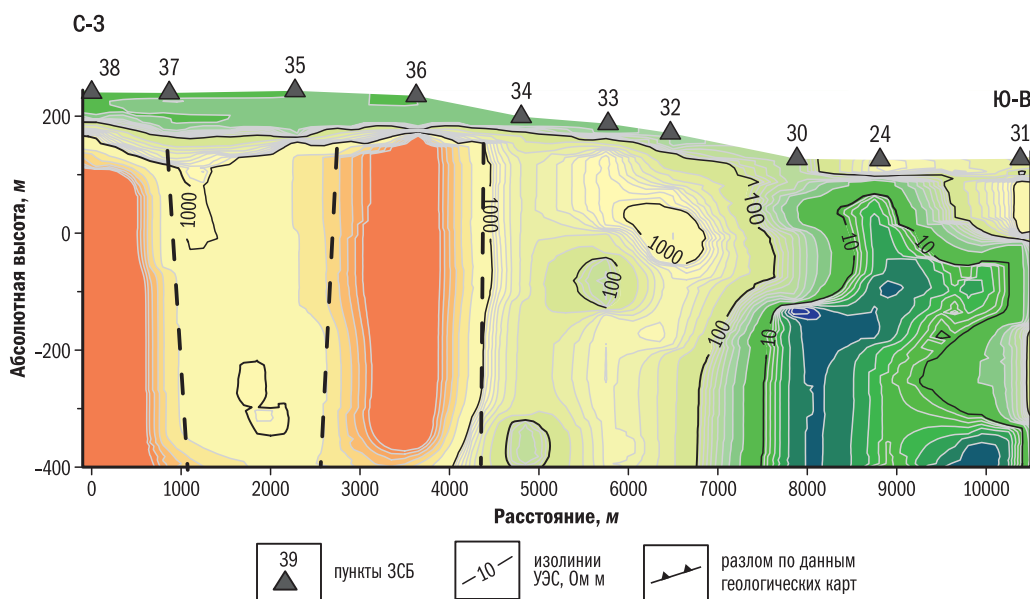


Рис. 6. Разрез по данным ЗСБ по профилю 2 (пункты 38–31) через северо-западный борт Горловской впадины

Разломы на разрезе показаны пунктиром в соответствии с их положением на геологической карте [Геологическая ..., 2014]. В интервале между пунктами 38–35 выделяется вертикальная зона пониженных значений УЭС, соответствующая по геологическим данным региональному разлому. Далее на разрезе в районе пунктов 34–30 наблюдается протяжённая зона понижения УЭС, которую можно отнести к надвигу. В структуре этого надвига видны более проводящие участки

со значениями УЭС около 100 Ом·м. В юго-восточной части профиля прослеживается значительная область аномально низкоомных отложений, которые по УЭС могут быть отнесены к угленосным породам. На этом профиле измерения будут продолжены методом ЗСБ в следующем полевом сезоне для уточнения (детализации) строения надвига с использованием разнесённых установок.

Обсуждение

Цель исследования достигнута, так как получены более полные представления о строении зоны сейсмической активизации северной части Горловской впадины методом ЗСБ до глубин в несколько сотен метров.

Новизна исследования заключается в получении новых знаний о строении северной части Горловской впадины. Впервые наглядно показаны структурные особенности разломных зон в геоэлектрических параметрах, а выбранный участок с наиболее низкими значениями УЭС разломной структуры может в перспективе использоваться для проведения регулярных наблюдений.

Первые две задачи были успешно решены. По результатам обработки и интерпретации полевых данных ЗСБ за несколько лет построены разрезы осадочного чехла впадины; по данным детальной съёмки в зонах разломов, ограничивающих впадину от Колывань-Томской складчатой зоны на северо-западе и от Салаирского антиклинория на юго-востоке, выявлены особенности их строения. Часть этих разломов, учитывая геологические данные, можно отнести к крупным, региональным. Вместе с тем исследовались и второстепенные дизъюнктивы. Все выделенные разломные структуры характеризуются на геоэлектрических разрезах зонами понижения удельного электрического сопротивления относительно вмещающих отложений, что свидетельствует об их активности. Для каждой из разломных зон получены следующие характеристики: интервал значений УЭС, наличие вертикальных и/или наклонных границ, ширина (в случае вертикальной зоны). Кроме того, показано, что по данным ЗСБ уточнено положение одной из разломных структур на местности относительно геологических данных.

Для третьей задачи рассмотрена классификация разломных зон по значениям УЭС. Наиболее низкие значения получены для системы разломных нарушений, выделенной на профиле 1 в интервале пикетов 47–53s (рис. 4). Эту зону разломов в настоящее время можно отнести к наиболее активной. В ней перспективно организовывать регулярные наблюдения методом ЗСБ.

В задачи этого исследования, в отличие от методов сейсморазведки [Канарейкин и др., 2023; Полянский и др., 2025], которые также используются на территории Горловской впадины, не входило детальное расчленение пластов антрацита, в целом смятых в мелкие круто-

падающие складки. Поэтому на разрезе северо-западного фрагмента профиля 1 (пикеты 7, 6, 5) и на разрезе по профилю 2 (пикеты 30, 24, 31) выделены обобщённые области, которые по значениям УЭС, учитывая лабораторные измерения, можно отнести к промышленным залежам антрацита. В отличие от разломных структур с УЭС в среднем от 80 до 300 Ом·м, антрациты характеризуются аномально низкими удельными электрическими сопротивлениями, составляющими единицы Ом·м и меньше. По данным ЗСБ можно оконтурить ещё не разведанные участки с присутствием антрацита, определив при этом глубины до кровли угленосной залежи, что будет важно при планировании и разработке новых залежей.

Стоит отметить, что предшествующие работы авторов статьи по мониторингу методами ВЭЗ и ЗСБ в Байкальской рифтовой зоне, в Горном Алтае, а также в Горловской впадине методом электротомографии (2022–2023 гг.) показали высокую чувствительность этих методов к изменениям напряжённо-деформированного состояния среды в сейсмоактивных районах [Неведрова et al., 2004; Шалагинов, Неведрова, 2023; Шалагинов и др., 2024; Шалагинов и др., 2026]. Метод ЗСБ как более глубокий по сравнению с электротомографией позволит получить больше информации при организации регулярных наблюдений, так как можно будет определять вариации УЭС подповерхностных и более глубоких горизонтов разреза, более близких к глубинам очагов происходящих землетрясений.

В перспективе планируется продолжение работ методом ЗСБ с целью дальнейшего уточнения строения. В частности, предполагается добавить пункты измерений на ряде участков профилей для увеличения детальности исследования и для построения карты распределения УЭС по площади.

Заключение

По результатам исследования очевидна эффективность изучения Горловской впадины методом ЗСБ. В целом наблюдается неплохая степень корреляции геоэлектрических структур на разных профилях, как между собой, так и с геологическими данными. Вместе с тем по электромагнитным данным можно уточнить положение разломов на местности относительно геологических данных.

По поводу регулярных электромагнитных наблюдений следует отметить, что авторы не претендуют на прогнозирование

происходящих сейсмических событий с указанием времени, места и магнитуды землетрясения. Но, опираясь на опыт проведения мониторинга в разных сейсмоактивных регионах России, на выявленную зависимость вариаций от величины его магнитуды и от азимута на событие, с помощью методов электроразведки в Горловской впадине можно будет дополнительно наблюдать за развитием сейсмического процесса с техногенной составляющей наряду с сейсмологическими методами.

Работа выполнена в рамках тем НИР FWZZ-2026-0049 «Электродинамика многомасштабной геологической среды как основа наукоемких технологий в нефтяной и рудной геологоразведке и инженерной геологии в Сибири и Арктической зоне РФ» Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук и FMUM-2022-0006 «Эволюционная динамика земной коры Сибири и развитие сейсмотектонических процессов, предшествующих катастрофическим событиям, по данным мониторинга землетрясений» Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук».

Литература

- Бабушкин С.М., Рыбушкин А.Ю., Терешкин Д.О., Неведрова Н.Н. Измерительный модуль для электромагнитных исследований // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы: тезисы докладов / Отв. ред. А.А. Маловичко. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. — С. 8. — EDN: PZSSJM
- Геологическая карта: N-44-XVIII (Черепаново). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Издание второе. Кузбасская серия. Масштаб 1:200000 / Под ред. Л.С. Ратанов. — Санкт-Петербург: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2014.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А. 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. — EDN: HOUDJN
- Иванов О.П., Сотников В.И., Федосеев Г.С., Кунгурцев Л.В. и др. Геодинамика, магматизм и металлогения Колывань-Томской складчатой зоны. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. — 227 с.
- Канарейкин Б.А., Сальников А.С., Напреев Д.В., Мосягин Е.В., Гошко Е.Ю. Возможности сейсморазведки при изучении складчатой структуры антрацитов (Горловский бассейн) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2023. — № 2 (54). — С. 33—41. — DOI: 10.20403/2078-0575-2023-2-33-40. — EDN: FJUAND
- Котельников А.Д., Максиков С.В., Котельникова И.В., Макаренко Н.А., Субботин К.С. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Издание второе. Серия Кузбасская. Лист N-44-XVIII — Черепаново. Объяснительная записка. — М: МФ ВСЕГЕИ, 2015. — 200 с.
- Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е., Шапаренко И.О., Санчаа А.М., Мариненко А.В. Строение и мониторинг в зоне сейсмической активизации Горловской впадины Алтае-Саянской складчатой области по данным электротомографии // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24, № 5. — ES5003. — DOI: 10.2205/2024ES000947. — EDN: JTUSOL
- Полянский П.О., Еманов А.Ф., Сальников А.С. Динамическая обработка преломлённых волн по материалам ОГТ в Горловском угольном бассейне // Геофизические исследования. — 2025. — Т. 26, № 1. — С. 39—66. — DOI: 10.21455/gr2025.1-3. — EDN: BHEWON
- Санчаа А.М., Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М., Шапаренко И.О., Шалагинов А.Е. Первые результаты исследований Горловской впадины наземными методами электроразведки с контролируемыми источниками // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2021а. — Т. 2, № 2. — С. 272—279. — DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-272-279. — EDN: DDKPBZ
- Санчаа А.М., Неведрова Н.Н., Штабель Н.В. Глубинное строение разломной зоны на участке Мухор-Тархата Чуйской впадины по данным нестационарных электромагнитных зондирования с использованием трехмерного моделирования // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2021б. — № 2 (46). — С. 67—73. — DOI: 10.20403/2078-0575-2021-2-67-73. — EDN: UXTTXB
- Хабинов О.Г., Власов А.А., Антонов Е.Ю. Система интерпретации данных площадных электромагнитных зондирования // ГЕО-Сибирь-2010. Т. 2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технология поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Ч. 1. Материалы VI Международного научного конгресса. — Новосибирск: СГГА, 2010. — С. 164—168. — EDN: PFOJQF
- Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н. Электромагнитный мониторинг в афтершоковый период Чуйского землетрясения 2003 г. в Горном Алтае: методика измерений, результат // Геодинамика и тектонофизика. — 2023. — Т. 14, № 4. — С. 0714. — DOI: 10.5800/GT-2023-14-4-0714. — EDN: XTXXXF

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. — С. 61–67. — DOI: 10.33764/2618-981X-2023-2-4-61-67. — EDN: BJJWMTM

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, № 1. — ES1007. — DOI: 10.2205/2026ES001056

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

Шебалин Н.В. Балльность, магнитуда и глубина очага землетрясений // Землетрясения в СССР. — М.: АН СССР, 1961. — С. 126–138.

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 Seis-

micity Features of the Gorlovsky Coal Basin // Seismic Instruments. — 2020. — V. 56, Iss. 3 — P. 254–268. — DOI: 10.3103/S0747923920030020. — EDN: XRKWQBQ

Kishkina S.B., Kocharyan G.G., Budkov A.M., Ivanchenko G.N., Loktev D.N. Impact of Open Pit Mining in Gorlovka Coal Basin on Large Earthquakes // Journal of Mining Science. — 2021. — V. 57, N 4. — P. 546–556. — DOI: 10.1134/S1062739121040025. — EDN: TPKYNQ

Nevedrova N.N., Epov M.I., Dashevskii Y.A. Determination of rock mass structure and results of active electromagnetic monitoring on the Baikal prognostic proving ground // Journal of Mining Science. — 2004. — V. 40, N 3. — P. 244–258. — DOI: 10.1007/s10913-005-0004-5. — EDN: LITMHH

Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Shaparenko I.O. Geoelectrical structure and monitoring in fault zones of Uimon depression in Gorny Altai region using electromagnetic methods // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. VIII International Symposium “Problems of Geodynamics and Geoecology of Intracontinental Orogens”. — V. 929. — IOP Publishing Ltd, 2021— P. 012025. — DOI: 10.1088/1755-1315/929/1/012025. — EDN: OHRRCI

ZondTEM1D // ZOND Software [сайт]. — URL: <http://zond-geo.com/english/zond-software/electromagnetic-sounding/zondtem1d/> (дата обращения 23.12.2025).

Сведения об авторах

Неведрова Нина Николаевна, д-р геол.-мин. наук, гл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Бабушкин Сергей Михайлович, вед. инженер Сейсмологического филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: babushkin.50@mail.ru

Санчаа Айдиса Михайловна, канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотр. ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

The structure of the Gorlovkaya depression in the zone of seismic activation according to transient electromagnetic data

© 2026 N.N. Nevedrova¹, S.M. Babushkin², A.M. Sanchaa¹

¹IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russia; ²SEB GS RAS, Novosibirsk, Russia

Received May 29, 2026

Abstract The Gorlovka Depression in the Novosibirsk Region, situated between the Kolyvan-Tomsk fold zone and the northwestern Salair anticlinorium, is delineated from these tectonic units by regional fault systems. The area is characterized by high intensity of tectonic deformation and hosts the largest anthracite reserves in Russia. Since 2019, seismological observations have recorded a significant increase in seismic activity within the depression, which, according to seismologists, is associated not only with natural tectonic processes but also with anthropogenic impacts. Earthquake hypocenters are concentrated within the zone of active open-pit coal mining in the northern part of the depression. This evolving seismicity may develop into a hazardous process for local infrastructure and population, necessitating systematic monitoring. For regular geoelectric surveillance, it is essential to characterize the subsurface structure of the seismically active area and identify fault structures potentially classified as seismogenic. In geoelectric cross-sections, active faults are typically expressed as zones of reduced electrical resistivity. To address this objective, field data from transient electromagnetic (TEM) soundings acquired along survey profiles in the northern depression – where earthquake epicenters and industrial mining blasts are concentrated – were utilized. The geoelectric models derived from data interpretation enable the delineation of faulted zones that are optimal for monitoring developing seismicity using geoelectric methods.

Keywords Gorlovka Depression, seismic activity, anthropogenic seismicity, transient electromagnetic method, TEM, electrical resistivity, fault structures, geoelectric monitoring, anthracite basin.

For citation Nevedrova, N.N., Babushkin, S.M., & Sanchaa, A.M. (2026). [The structure of the Gorlovkaya depression in the zone of seismic activation according to transient electromagnetic data]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 8(3), 58-70. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.3.04>. EDN: NAYBYJ

References

- Babushkin, S.M., Rybushkin, A.Yu., Tereshkin, D.O., & Nevedrova, N.N. (2021). [Measuring module for electromagnetic research]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Tezisy XV Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly. Otv. red. A.A. Malovichko* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Abstracts of the XV International Seismological Workshop. Resp. ed. A.A. Malovichko] (pp. 8-8). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: PZSSJM
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Fateev, A.V., Shevkunova, E.V., & Gladyshev, E.A. (2021). [Technogenic seismic activation in the Gorlovka coal basin]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk* [Fundamental and applied issues of mining sciences], 8(1), 207-210. (In Russ.). DOI: [10.15372/FPVGN2021080132](https://doi.org/10.15372/FPVGN2021080132). EDN: HOUDJN
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Pavlenko, O.V., Fateev, A.V., Kuprish, O.V., & Podkorytova, V.G. (2020). Kolyvan Earthquake of January 9, 2019, with $M_L=4.3$ and Induced Seismicity Features of the Gorlovsky Coal Basin. *Seismic Instruments*, 56(3), 254-268. DOI: [10.3103/S0747923920030020](https://doi.org/10.3103/S0747923920030020). EDN: XRKWBQ
- Ivanov, O.P., Sotnikov, V.I., Fedoseev, G.S., Kungurtsev, L.V. et al. (1999). *Geodinamika, magmatizm i metallogeniia Kolyvan'-Tomskoi skladchatoi zony* [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Kolyvan-Tom fold zone]. Novosibirsk, Russia: SB RAS, OIGGM Publ., 227 p. (In Russ.).
- Kanareikin, B.A., Salnikov, A.S., Napreev, D.V., Mosyagin, E.V., & Goshko, E.Yu. (2023). [Possibilities of seismic exploration in studying the folded structure of anthracites (Gorlovsky basin)]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* [Geology and mineral resources of Siberia], 2(54), 33-41. (In Russ.). DOI: [10.20403/2078-0575-2023-2-33-40](https://doi.org/10.20403/2078-0575-2023-2-33-40). EDN: FJUAHD
- Khabinov, O.G., Vlasov, A.A., & Antonov, E.Yu. (2010). [System for interpreting area electromagnetic sounding data]. In *GEO-Sibir'-2010. T. 2. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Nove napravleniia i tekhnologiya poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh. Ch. 1. Materialy VI Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa* [GEO-Siberia 2010. Vol. 2. Subsoil Use. Mining. New Directions and Technologies for Searching, Exploration, and Development of Mineral Deposits. Part 1. Proceedings of the 6th International Scientific Congress] (pp. 164-168). Novosibirsk, Russia: SSGA Publ. (In Russ.). EDN: PFOJQF

- Kishkina, S.B., Kocharyan, G.G., Budkov, A.M., Ivanchenko, G.N., & Loktev, D.N. (2021). Impact of Open Pit Mining in Gorlovka Coal Basin on Large Earthquakes. *Journal of Mining Science*, 57(4), 546-556. DOI: 10.1134/S1062739121040025. EDN TPKYNQ
- Kotelnikov, A.D., Maksikov, S.V., Kotelnikova, I.V., Makarenko, N.A., & Subbotin, K.S. (2015). *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1: 200 000. Izdaniye vtoroye. Seriya Kuzbasskaya. List N-44-KHVIII – Cherepanovo. Ob"yasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 200,000. Second edition. Kuzbass series. Sheet N-44-XVIII – Cherepanovo. Explanatory note]. Moscow, Russia: VSEGEI Publ., 200 p. (In Russ.).
- Nevedrova, N.N., Epov, M.I., & Dashevskii, Y.A. (2004). Determination of rock mass structure and results of active electromagnetic monitoring on the Baikal prognostic proving ground. *Journal of Mining Science*, 40(3), 244-258. DOI: 10.1007/s10913-005-0004-5. EDN: LITMHH
- Nevedrova, N.N., Sanchaa, A.M., & Shaparenko, I.O. (2021). Geoelectrical structure and monitoring in fault zones of Uimon depression in Gorny Altai region using electromagnetic methods. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. VIII International Symposium "Problems of Geodynamics and Geocology of Intracontinental Orogens"*, Vol. 929 (012025). IOP Publishing Ltd. DOI: 10.1088/1755-1315/929/1/012025. EDN: OHRRCI
- Nevedrova, N.N., Shalaginov, A.E., Shaparenko, I.O., Sanchaa, A.M., & Marinenko, A.V. (2024). [Structure and monitoring in the seismic activation zone of the Gorlovka depression of the Altai-Sayan folded region according to electrical tomography data]. *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(5), ES5003. (In Russ.). DOI: 10.2205/2024ES000947. EDN: JTUSOL
- Polyansky, P.O., Emanov, A.F., & Salnikov, A.S. (2025). [Dynamic processing of refracted waves using CDP materials in the Gorlovka coal basin]. *Geofizicheskiye issledovaniya* [Geophysical Research], 26(1), 39-66. (In Russ.). DOI: 10.21455/gr2025.1-3. EDN: BHEWOH
- Ratanov, L.S. (Ed.) (2014). *Geologicheskaya karta: N-44-XVIII (Cherepanovo). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Izdanie vtoroe. Kuzbasskaya seriya. Masshtab 1:200000* [Geological map: N-44-XVIII (Cherepanovo). State geological map of the Russian Federation. Second edition. Kuzbass series, scale: 1:200000]. St. Petersburg, Russia: VSEGEI Publ. (In Russ.).
- Sanchaa, A.M., Nevedrova, N.N., Babushkin, S.M., Shaparenko, I.O., & Shalaginov, A.E. (2021a). [First results of studies of the Gorlovka depression using ground-based electrical prospecting methods with controlled sources]. *Interexpo GEO-Sibir'* [Interexpo GEO-Siberia], 2(2), 272-279. (In Russ.). DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-272-279. EDN: DDKPBZ
- Sanchaa, A.M., Nevedrova, N.N., & Shtabel, N.V. (2021b). [Deep structure of the fault zone in the Mukhor-Tarkhata section of the Chuya depression according to non-stationary electromagnetic sounding data using three-dimensional modeling]. *Geologiya i mineral'no-syr'yevyye resursy Sibiri* [Geology and mineral resources of Siberia], 2(46), 67-73. (In Russ.). DOI: 10.20403/2078-0575-2021-2-67-73. EDN: UXTTXB
- Shalaginov, A.E., & Nevedrova, N.N. (2023). [Electromagnetic Monitoring during the Aftershock Period of the 2003 Chuya Earthquake in the Mountain (Gorny) Altai: Measurement Methodology, Results]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and Tectonophysics], 14(4), 0714. (In Russ.). DOI: 10.5800/GT-2023-14-4-0714. EDN: XTXXKF
- Shalaginov, A.E., Nevedrova, N.N., & Babushkin, S.M. (2023). [Geoelectric structure of the fault boundary of the Gorlovsky trough of the Novosibirsk region according to non-stationary electromagnetic sounding data]. *Interexpo GEO-Sibir'* [Interexpo GEO-Siberia], 2(4), 61-67. (In Russ.). DOI: 10.33764/2618-981X-2023-2-4-61-67. EDN: BJJWMT
- Shalaginov, A.E., Nevedrova, N.N., Shaparenko, I.O., & Balkov, E.V. (2026). [Results of regular observations using electrical resistivity tomography in the Gorlovskaya depression of the Altai-Sayan folded region]. *Russian Journal of Earth Sciences*, 26(1), ES1007. (In Russ.). DOI: 10.2205/2026ES001056
- Shalaginov, A.E., Nevedrova, N.N., Shaparenko, I.O., & Marinenko, A.V. (2024). [Variations in electrical resistivity as a result of natural-technogenic geodynamic processes in the Gorlovka depression of the Altai-Sayan folded region according to electrical tomography data]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering], 335(11), 32-43. (In Russ.). DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4503. EDN: BCFCSE
- Shebalin, N.V. (1961). [Earthquake intensity, magnitude, and focal depth]. In *Zemletriaseniya v SSSR* [Earthquakes in the USSR] (pp. 126-138). Moscow, Russia: AS USSR Publ. (In Russ.).
- ZOND Software. (2025). ZondTEM1D. Retrieved from <http://zond-geo.com/english/zond-software/electromagnetic-sounding/zondtem1d/>

Information about authors

Nevedrova Nina Nikolaevna, Dr., Chief Researcher of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Babushkin Sergey Mikhailovich, Leading engineer of the Seismological Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (SEB GS RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: babushkin.50@mail.ru

Sanchaa Aydisa Mikhailovna, PhD, Leading Researcher of the IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru