

Влияние сейсмических событий на геоэлектрические параметры многолетней мерзлоты в Горном Алтае

Н. Н. Неведрова^{1,2}, П. В. Пономарев², А. М. Санчаа¹, И. О. Шапаренко¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

²Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба Российской академии наук”, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, e-mail: petruss1985@gmail.com

Поступила в редакцию 24.12.2024, принята к печати 20.05.2025

Объект исследования. Эпицентральная зона разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г. ($M = 7.2$), которое характеризуется продолжительным нелинейным афтершоковым периодом. Эпицентр землетрясения находился в межгорной перемычке между Чуйской и Курайской впадинами Горного Алтая, всего в 15 км от участка исследования, расположенного в западной части Чуйской впадины в долине р. Чаган. **Цель.** По данным регулярных наблюдений проследить динамику изменений геоэлектрических параметров многолетнемерзлых пород во время афтершокового периода землетрясения с учетом характеристик сейсмичности Чуйско-Курайской сейсмоактивной зоны. **Методы.** Для выявления областей распространения многолетнемерзлых пород в долине использованы методы постоянного и переменного тока с контролируемыми источниками (электромагнитные зондирования становлением поля, вертикальные электрические зондирования, электротомография); регулярные наблюдения выполнялись методом вертикального электрического зондирования. **Результаты.** Исследование позволило определить вариации мощности и удельного электрического сопротивления слоя многолетнемерзлых пород. Сопоставление параметров сейсмической активности территории с геоэлектрическими характеристиками мерзлоты показало значительное влияние на них изменений сейсмического режима. В периоды активизаций мощность и удельное электрическое сопротивление многолетней мерзлоты уменьшались и увеличивались при снижении активности, при этом вариации геоэлектрических параметров достигали 50–80%. **Выводы.** Полученные результаты демонстрируют возможность применения методов геоэлектрики для регулярных наблюдений за состоянием многолетнемерзлых пород, подчеркивая их эффективность для понимания взаимосвязи между сейсмической активностью и геоэлектрическими параметрами мерзлоты.

Ключевые слова: сейсмоактивная зона Горного Алтая, Чуйская впадина, электромагнитные методы, мониторинг состояния многолетнемерзлых пород, сейсмическая энергия, удельное электрическое сопротивление

Источник финансирования

Работы выполнены при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственных заданий) № FWZZ-2022-0025 и № 075-00604-25

Impact of seismotectonic processes on the geoelectrical parameters of permafrost in the Altai mountains

Nina N. Nevedrova^{1,2}, Petr V. Ponomarev², Aidisa M. Sancha¹, Ilya O. Shaparenko¹

¹A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, 3 Academician Koptug av., Novosibirsk 630090, Russia

²Federal Research Center “Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences”, 3 Academician Koptug av., Novosibirsk 630090, Russia, e-mail: petruss1985@gmail.com

Received 24.12.2024, accepted 20.05.2025

Research object. The epicentral zone of the destructive Chuya earthquake of 2003 ($M = 7.2$), characterized by a prolonged nonlinear aftershock period. The epicenter of the earthquake was located in the intermountain pass between the Chuya and Kurai depressions of the Altai Mountains, only 15 km from the study site located in the western part of the Chuya depression in the Chagan River valley. **Aim.** To determine the geoelectrical structure of the Chagan River valley, to

Для цитирования: Неведрова Н.Н., Пономарев П.В., Санчаа А.М., Шапаренко И.О. (2025) Влияние сейсмических событий на геоэлектрические параметры многолетней мерзлоты в Горном Алтае. *Литосфера*, 25(6), 1416–1427. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-6-1416-1427>. EDN: NYOZPJ

For citation: Nevedrova N.N., Ponomarev P.V., Sancha A.M., Shaparenko I.O. (2025) Impact of seismotectonic processes on the geoelectrical parameters of permafrost in the Altai mountains. *Lithosphere (Russia)*, 25(6), 1416–1427. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-6-1416-1427>. EDN: NYOZPJ

© Н.Н. Неведрова, П.В. Пономарев, А.М. Санчаа, И.О. Шапаренко, 2025

identify areas of development of permafrost deposits. Additionally, to track the dynamics of changes in the geoelectrical parameters of permafrost deposits during the aftershock period of the earthquake based on regular long-term observations, and to compare the geoelectrical data with the seismicity characteristics of the Chuya–Kurai seismic active zone. *Methods.* Electromagnetic methods with a controlled source were used to study the distribution of permafrost deposits in the valley, which exhibited uneven distribution. *Results.* The study allowed us to determine variations in the thickness and specific electrical resistivity of the layers of permafrost. Comparison of the seismic activity parameters of the area with the geo-electrical characteristics of the permafrost showed a significant influence of changes in seismic regime on these properties. During the periods of activation, permafrost degraded, while recovery occurred during the periods of reduced activity, with variations in geo-electrical parameters reaching 50–80%. *Conclusions.* The obtained results demonstrate the potential of using electromagnetic methods for continuous monitoring of the state of permafrost, emphasizing their effectiveness in understanding the relationship between seismic activity and the state of permafrost.

Keywords: seismic active zone, Altai Mountains, Chuya depression, electromagnetic methods, monitoring permafrost state, seismic energy, electrical resistivity

Funding information

The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of Russia (within the framework of state assignments) No. FWZZ-2022-0025 and No. 075-00604-25

ВВЕДЕНИЕ

Большая часть российских территорий, занятых многолетней мерзлотой, находится за полярным кругом, но она присутствует и в горных регионах, в частности в межгорных впадинах. С увеличением высотных отметок увеличивается и мощность многолетнемерзлых пород (ММП) (Железняк, 2005; Шац, Скачков, 2016). Абсолютные высотные отметки дневной поверхности самой крупной в регионе Чуйской впадины в ее бортовых частях достигают 2000–2200 м, что способствует наличию ММП. Решение связанных с ними проблем, таких как термокараст, солифлюкция, всегда было актуальным (Fukui et al., 2007).

На территории всех внутригорных алтайских впадин развивается земледелие, животноводство и, соответственно, жилая и промышленная инфраструктура. Долина р. Чаган юго-западного замыкания Чуйской впадины исторически является местом поселения и деятельности коренных народов Алтая. В долине ежегодно проводятся посадки многолетних кормовых растений, построены животноводческие фермы, на севере расположен пос. Бельтир. Многолетнемерзлые породы здесь вскрыты скважинами, наблюдаются в телах имеющихся оползней. Криогенные объекты являются важными элементами экосистемы, требующими более глубокого изучения и мониторинга, а также важными элементами объектов промышленного освоения (Cunningham et al., 2015; Туренко, Дружинина, 2018; Glinskikh et al., 2021; Хрусталев, Хилимонюк, 2022). В свете изложенного актуальны регулярные наблюдения за изменениями ММП, определение главных влияющих на них факторов.

Считается, что на деструктивные процессы, связанные с мерзлотой, в первую очередь влияют температурные условия, и дискуссионная проблема

изменения климата Земли напрямую связана с исследованиями состояния многолетнемерзлых горных пород, современных темпов их деградации, особенно на территории Российской Федерации, где до 60% территории занято криолитозоной. По прогнозам экспертов, глобальная температура воздуха к 2060 г. может повыситься на 1.9–3.3°C, также растет температура внутри криолитозоны, в связи с чем наблюдается активное таяние мерзлоты в арктических районах (Разумов, 2015; Bartsch et al., 2023). Например, на территории стационара “Надым” за последние 40 лет температура ММП повысилась на 0.8–1.4°C (Печкин и др., 2018). Считается, что температурные условия в этой зоне за полярным кругом будут и далее существенно изменяться (Шац, Скачков, 2015).

В Горном Алтае протекают аналогичные процессы. Об этом свидетельствуют, например, результаты международных наблюдений за состоянием мерзлоты, которые проводятся с 2009 г. в Монгольском Алтае, где выполняется площадной мониторинг по сети скважин в зоне ММП. Анализ результатов показал, что, например, за период с 1959 по 2013 г. наблюдалось как повышение среднегодовой температуры воздуха на 0.77°C, так и повышение температуры мерзлоты на 0.14°C (Алтангэрэл, Цогбадрал, 2016). Но в сейсмоактивных горных районах температурный фактор является не единственным. В ряде публикаций отмечается, что в последнее десятилетие в российском Горном Алтае активизируются такие негативные процессы, как термокараст, наледи, береговые эрозии, оползни, обвалы, связанные с изменениями ММП (Достовалова, Шитов, 2011). Есть мнение специалистов-геологов, что на оползневую активность влияют происходящие геодинамические процессы. В публикации (Достовалова, Шитов, 2011) отмечается, что повышение сейсмической активности приводит к образованию трещин, разгрузке криогенных вод в виде

появления родников на поверхности, образованию наледей. Данные многолетнего электромагнитного мониторинга в районе Горного Алтая подтверждают существенное влияние сейсмической активности на состояние массива горных пород, включая и многолетнемерзлые (Shalaginov, Nevedrova, 2024). На территории России методы электроразведки в основном используются для определения параметров криолитозоны (мощности, удельного электрического сопротивления), но регулярных наблюдений этими методами пока недостаточно (Нерадовский, 2013, 2017а, 2018; Ефремов, 2017; Buddo et al., 2022; Мурзина и др., 2022; Глинских и др., 2023; Никитенко и др., 2023).

Эта статья посвящена комплексным многолетним геоэлектрическим исследованиям в долине р. Чаган, начатым вскоре после Чуйского землетрясения 2003 г. с магнитудой 7.2 и продолжающимся в настоящее время. По результатам исследований выяснено строение долины, выявлены области развития ММП, имеющие островной характер. Кроме того, по результатам исследований методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) име-

ется возможность проследить динамику изменений геоэлектрических параметров многолетней мерзлоты во время афтершокового периода Чуйского землетрясения 2003 г. с несколькими интервалами активизаций и сейсмических затиший. Сопоставление данных геоэлектрики с характеристиками сейсмичности Чуйско-Курайской зоны позволяет выявить степень влияния на криолитозону происходящих сейсмических событий.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наблюдения в долине р. Чаган выполняются после Чуйского землетрясения комплексом методов постоянного и переменного тока в течение более 20 лет. В комплекс входят ВЭЗ, электротомография (ЭТ), электромагнитные зондирования становлением поля (ЗСП) (рис. 1).

Методом ВЭЗ получен основной объем полевых данных для построения геоэлектрических моделей долины и регулярных наблюдений. Метод ЗСП использовался для уточнения глубины залегания кровли фундамента, а с помощью электрото-

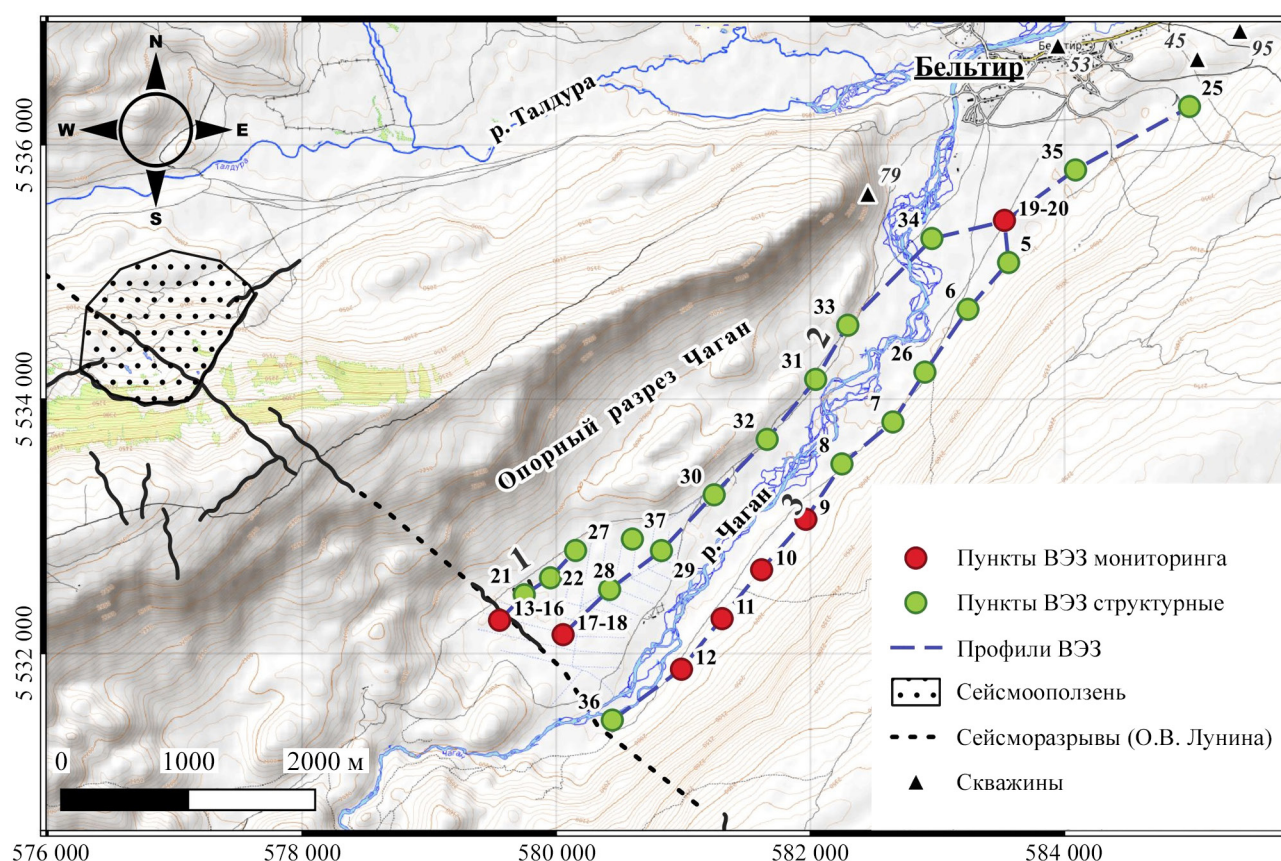


Рис. 1. Карта фактического материала геофизических наблюдений в долине р. Чаган (западная часть Чуйской впадины Горного Алтая).

Fig. 1. Map of factual observation material using VES and electrical tomography methods in the river Chagan valley (western part of the Chuya depression of the Altai Mountains).

мографии построены детальные разрезы до глубин 50–100 м в зонах имеющихся разломов. Измерения в крестовых и круговых пунктах ВЭЗ (ВЭЗ № 13–16, 17–18, 19–20), а также по отрезку профиля ВЭЗ № 9–12 повторяются каждый год в летний период (см. рис. 1). Размещение пунктов ВЭЗ отчасти обусловлено топографическими особенностями долины с крутыми бортами, заболоченными участками, выходами кристаллических пород фундамента. В целом профили ВЭЗ ориентированы примерно вкрест системе сейсмодислокаций, образовавшихся после разрушительного Чуйского землетрясения.

Для полевых работ методом ВЭЗ используются электроразведочный генератор Астра-100 и измеритель SGD-EET “MEDUSA”. Максимальная выходная мощность генератора в 100 Вт способна обеспечить глубинность исследования до первых сотен метров в существующих геоэлектрических условиях. Измеритель MEDUSA-B2 предназначен для измерения и сохранения в энергонезависимой памяти значений разности потенциалов на приемном диполе (MN) и тока в питающем диполе (AB) при производстве электроразведочных работ методами постоянного и переменного тока. Измерения выполнялись с четырехэлектродной установкой Шлюмберже с максимальным размером генераторной линии $AB/2 = 1000$ м. В геоэлектрических условиях долины такая установка в большинстве случаев позволяет получить полный разрез осадочной толщи и параметры палеозойского основания. Пункты ВЭЗ расположены по трем профилям, пересекающим участок с юго-запада на северо-восток. Измерения по короткому профилю № 1 (ВЭЗ № 13, 21, 22, 27) выполнены в зоне развития сейсмодислокаций магистрального разрыва Чуйского землетрясения с шагом в среднем 200 м. На двух более длинных профилях № 2 и 3 расстояние между пунктами составляет в основном 500 м.

По данным ЗСБ, пункты которого совмещались с пунктами ВЭЗ, получены и верифицированы в сопоставлении с данными ВЭЗ толщины слоев кайнозойского комплекса и его общая мощность. Для реализации ЗСБ использована аппаратура Байкал-МЭРС с установкой “соосные” симметричные петли с размерами генераторной петли 200×200 м, а приемной – 100×100 м, что позволило достигнуть необходимой глубинности (Бабушкин, Неведрова, 2017).

С привлечением метода электротомографии ранее получены детальные геоэлектрические параметры верхней части разреза наиболее сложнопостроенных участков с присутствием многолетней мерзлоты и разломов. С его помощью дополнительно обоснованы выделенные по данным ВЭЗ разломные нарушения, определены их параметры, такие как ширина разломной зоны, возможный наклон сместителя (Неведрова и др., 2017). Работы выпол-

нены с помощью современной разработки ИНГГ СО РАН станции “Скала-48М” (Балков и др., 2012). Длина стандартной расстановки ЭТ составляла 235 м с шагом в 5 м между электродами. Были выбраны установки Шлюмберже и трехэлектродная, а для создания профиля нужной длины использована нагоняющая расстановка (roll along).

Интерпретация всего комплекса полевых данных методов геоэлектрики основана на решении обратной задачи с использованием интерактивных программных комплексов моделирования и инверсии: EMS, Geotomo Software, Zond Software, (Хабинов, 2009; <http://www.geotomosoft.com>; <http://zond-geo.ru>), и согласовании результатов разноглубинного комплекса методов. В ходе интерпретации привлечены все возможные данные по имеющимся скважинам, литолого-стратиграфические разрезы, что служило привязкой и обоснованием стартовых геоэлектрических моделей. С помощью количественной интерпретации с учетом геологических данных получены наиболее достоверные геоэлектрические характеристики горных пород, слагающих несимметричный грабен долины р. Чаган.

Регулярные наблюдения методом ВЭЗ в течение длительного времени (2004–2019 гг.) дают возможность проследить временные изменения геоэлектрических параметров горных пород, в том числе и многолетнемерзлых, под воздействием сеймотектонических процессов и оценить их количественно. Полученные данные геоэлектрики сопоставляются с характеристикой сейсмического режима территории, что позволяет выявить влияние текущей сейсмической активности на зоны ММП. Температурный тренд и климатические прогнозы пока не рассматриваются из-за недостатка данных. Наблюдая за воздействием на ММП сейсмических событий и учитывая возможный климатический тренд, можно считать, что процессы частичной или полной деградации мерзлоты в горных районах будут усиливаться, что угрожает сохранности жилой инфраструктуры, автодорог, трубопроводов и прочих значимых хозяйственных объектов.

ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ГЕОЛОГО- ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Чуйское землетрясение 2003 г. с магнитудой 7.2 существенно изменило облик долины р. Чаган в западной части Чуйской впадины. Его эпицентр расположен в межвпадинной перемычке, разделяющей Чуйскую и Курайскую впадины, всего в 20 км от пос. Бельтир. Система первичных сейсмогенных разрывов землетрясения хорошо выражена на дневной поверхности в южной части долины (см. рис. 1). На поверхности наблюдается целый ряд субпараллельных глубоких трещин и рвов большой протяженности шириной до 6 м. Катастро-

фически пострадал пос. Бельтир, жилой фонд которого был практически разрушен. Именно здесь и в пойме р. Чаган происходили яркие вторичные эффекты события, такие как алевритопесчаные вулканы, грифоны, обширные площадные разливы грязевого материала. На территории поселка были затоплены все низины. Высота водно-грязевых фонтанов в зоне сейсморазрывов достигала нескольких метров (Рогожин и др., 2007; Lunina et al., 2008).

Глубинное строение долины, мощность осадочной толщи, удельное электрическое сопротивление (УЭС) и мощность отдельных горизонтов определены по данным комплекса методов наземной электроразведки с учетом параметрических измерений методами постоянного тока на опорном разрезе Чаган (Деев и др., 2012), а также имеющихся геологических и других априорных материалов. По геолого-геофизическим данным в разрезе выделены два разновозрастных осадочных комплекса. Нижний буроватый комплекс содержит в своем основании среднемиоцен-плиоценовые карбонатные алевритистые глины и глинистые алевриты туевской свиты, которые вверх по разрезу постепенно фациально замещаются озерно-аллювиальными отложениями бекенской свиты. Низкие значения УЭС этого комплекса с толщинами от 100 до 200 м находятся в интервале примерно от 20 до 60 Ом·м. Выше залегает сероцветный полифациальный комплекс, представленный в основном ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями, связанными с эпохами плейстоценовых оледенений. В приповерхностной части разреза наблюдаются позднеплейстоценовые флювиогляциальные галечники и тонкозернистые озерно-ледниковые отложения с присутствием голоценового аллювия (русловые галечники, пойменные алевриты, пески, суглинки). Эти отложения характеризуются УЭС в широком интервале значений, что, по мнению специалистов-геологов, объясняется гранулометрическими различиями голоценового руслового и пойменного аллювия р. Чаган, представленного как галечниками, так и алевросеками (Деев и др., 2012; Русанов, Важов, 2014). Подстилает осадочные горизонты относительно неглубоко залегающий палеозойский фундамент с УЭС 5000 Ом·м. Глубины до фундамента, по данным ВЭЗ и ЗСБ, составляют 100–150 м в приподнятых юго-западных блоках замыкания впадины и достигают 300–400 м при движении на северо-восток.

На этапе обработки полевых данных ВЭЗ выявлены некоторые важные особенности строения долины. Интервалы в самой верхней части разреза с максимальными значениями УЭС и мощностью в интервале от 15 до 100–150 м, по геолого-геофизическим данным, скорее всего, соответствуют зонам развития многолетней мерзлоты. На целом ряде кривых кажущегося удельного сопротивления

ВЭЗ наблюдается максимум, амплитуда которого свидетельствует о присутствии в разрезе отложений с аномально высокими значениями УЭС, достигающими, по данным отдельных зондирований, 15 000–20 000 Ом·м. С учетом априорной информации (Патрин, 1991ф; Неведрова и др., 2001; Оленченко и др., 2011) отложения с таким уровнем УЭС отнесены к многолетнемерзлым. Рассмотрим типичные кривые и геоэлектрические модели по данным ВЭЗ № 21 и 33 (рис. 2). Пункт ВЭЗ № 21 находится на юго-западе площади на профиле № 1. Значения УЭС и мощности четвертого горизонта характеризуют ММП этой территории. ВЭЗ № 33 расположен на профиле № 2, мощность второго высокоомного горизонта составляет 1.3 м, что свидетельствует об отсутствии ММП в районе этого пункта наблюдения.

В качестве примера рассмотрены двумерные геоэлектрические разрезы по профилям № 2 и 3 ВЭЗ, выполненные с юго-запада на северо-восток по простиранию долины (рис. 3а, б). На обоих разрезах верхняя часть до глубин 20–100 м характеризует зональное распределение ММП. Разрезы построены по результатам двумерной инверсии с помощью программы ZondIP1D (<http://zond-geo.ru>).

Представленные по данным ВЭЗ разрезы демонстрируют, что многолетнемерзлые высокоомные породы не имеют сплошного распространения в изученной части долины. Максимальные мощности этих пород наблюдаются в юго-западном замыкании долины и на северо-восточном отрезке профиля № 3 и вскрыты скважинами недалеко от пос. Бельтир. В центральной части долины на профиле № 2 мощность ММП менее значительна. Для анализа изменений мерзлоты с течением времени также рассчитано поперечное сопротивление слоя ММП. Параметр получен в результате решения обратной задачи для всего объема данных ВЭЗ.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ. СОПОСТАВЛЕНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

По опубликованным сейсмологическим данным за 2003–2019 гг., Чуйское землетрясение 2003 г. сопровождается длительным, до сих пор не завершенным афтершоковым процессом, во время которого активные периоды чередуются с сейсмическими затишьями (Еманов и др., 2021). При повышении сейсмической активности происходят сейсмические события разного энергетического класса, включая достаточно крупные, с магнитудами 4–5 и более. В качестве характеристик сейсмичности из опубликованных каталогов получены данные о числе землетрясений и количестве выделившейся сейсмической энергии в районе исследований за каждый год.

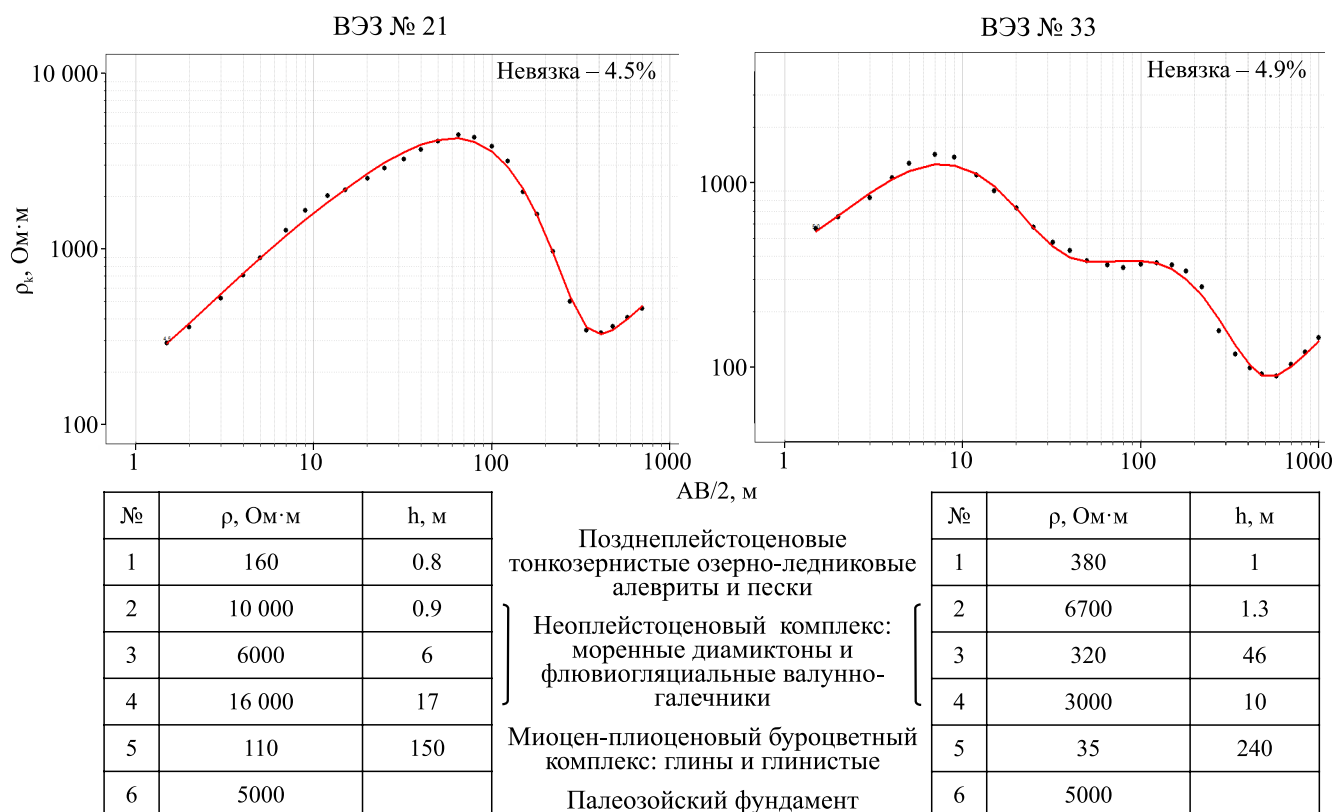


Рис. 2. Характерные кривые ВЭЗ и полученные геоэлектрические модели.

Fig. 2. Typical VES curves and the resulting geoelectric models.

Сейсмические события выбирались исходя из эмпирического уравнения регрессии: $0.9K - 3 \cdot \lg R - 0.5 = 0$, где K – энергетический класс землетрясения, R – эпицентральное расстояние (расстояние от эпицентра до пункта наблюдения ВЭЗ). Подобное уравнение регрессии получено эмпирически и обосновано теоретически при анализе результатов мониторинга методом ВЭЗ в Байкальской рифтовой зоне (дельта р. Селенга) (Неведрова, Дашевский, 2000; Дашевский и др., 2000). Известно, что в этой системе действует механизм растяжения, вызванный в основном внутренними источниками энергии, и преобладают сбросовые разломы (Логачев, 1999).

В Горном Алтае деформации литосферы связаны с воздействием Индо-Евразийской коллизии, современное поле напряжений наблюдается с ориентацией С-Ю и присутствуют в основном неотектонические сжимающие напряжения, а разломы – надвиговые и сдвиговые (Дельво и др., 1995; Добрецов и др., 2013; Буслов, Имаев, 2020). Эта разница предполагает другие коэффициенты в уравнении регрессии. Для данной статьи коэффициенты уравнения подбирались таким образом, чтобы исключить слишком удаленные и имеющие низкий энергетический класс землетрясения, в то же время

необходимо иметь представительную выборку числа значимых событий для сопоставления с геоэлектрическими данными.

Кроме того, учитывались особенности построения сейсмологических сетей в разные годы наблюдений, так как уровень представительности каталогов землетрясений в разные годы менялся. В данной работе учитывались землетрясения с $M > 2$. В результате из каталогов землетрясений Чуйско-Курайской зоны за 2004–2019 гг., в которых содержится более 12 000 событий, по приведенному выше критерию выбраны 340 событий (рис. 4) (ФИЦ ЕГС РАН). Число сейсмических событий из выборки в районе исследований значительно варьируется год от года: от 0–2 событий в периоды затишья (2007, 2011, 2014–2017) до 6–12 в активные периоды (2010, 2013, 2019).

Для совместного анализа с данными ВЭЗ использовано количество суммарной выделившейся сейсмической энергии ($\lg(E)$, Дж). На рис. 5 показано сопоставление $\lg(E)$ с геоэлектрическими параметрами моделей ВЭЗ № 9, полученных в результате инверсии, за каждый год наблюдений. Этот пункт находится в зоне развития ММП, мощность мерзлоты здесь составляет 16 м, и залегание практически горизонтально-слоистых от-

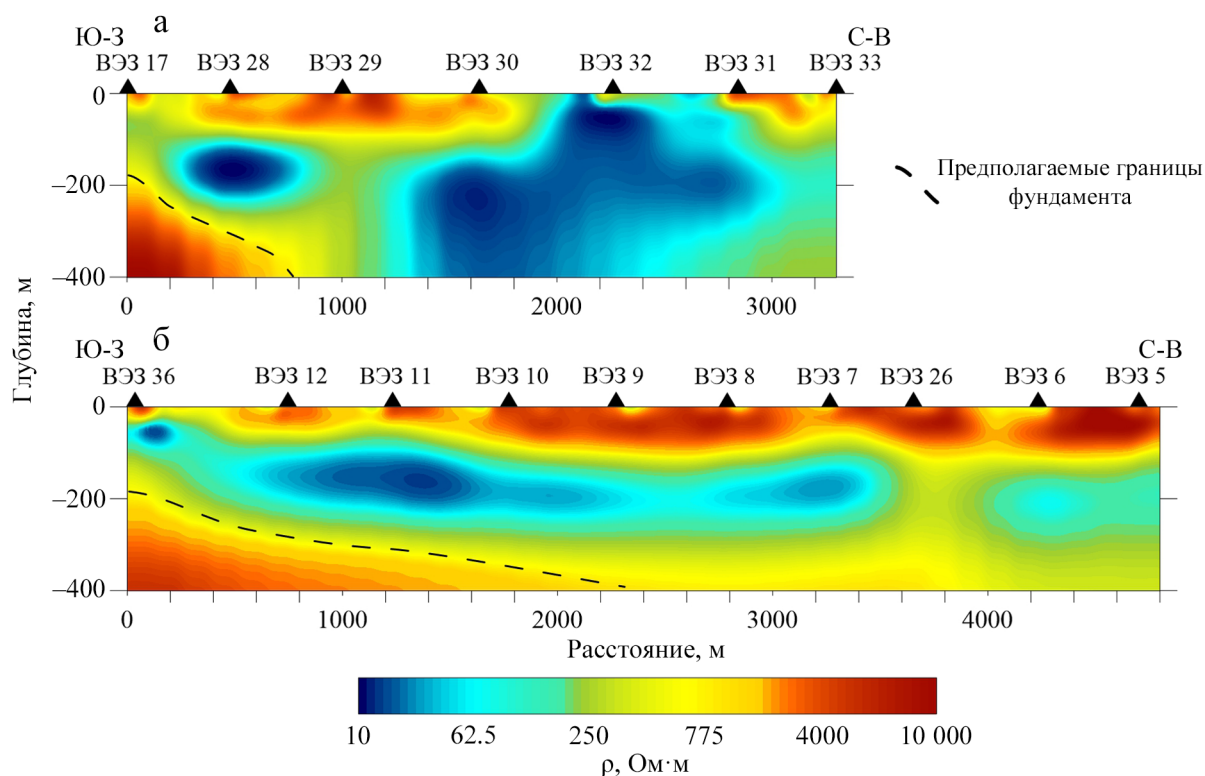


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы.

а – по профилю ВЭЗ № 2, б – по профилю ВЭЗ № 3.

Fig. 3. Geoelectric sections.

а – along the VES profile No. 2, б – along the VES profile No. 3.

ложений не создает неоднородностей, искажающих полевые данные. Интерпретация выполнена с использованием горизонтально-слоистой модели с невязкой $\approx 5\%$. В полученной в результате инверсии модели содержится 6 слоев, из них три верхних относятся к четвертичным отложениям, а четвертый горизонт с УЭС 9300 Ом·м и мощностью 16 м, отнесенный к многолетней мерзлоте, выделен на рис. 5 оттенками красного цвета, в его пределах подписаны значения УЭС, а также поперечного сопротивления за каждый год наблюдений. Пятый проводящий слой мощностью в 220 м залегает на высокоомном основании. Можно наблюдать динамику изменений удельного электрического сопротивления разреза с течением времени по данным регулярных наблюдений в пункте ВЭЗ № 9.

Хорошо видно, что геоэлектрические параметры всех горизонтов разреза реагируют на изменение сейсмической активности. В частности, в периоды ее уменьшения в 2011 и 2015 гг. увеличиваются УЭС и поперечное сопротивление горизонта многолетнемерзлых отложений и, напротив, когда активность возрастает (2012, 2018–2019 гг.), эти параметры уменьшаются.

Таким образом, по результатам сопоставления сейсмологических и геоэлектрических данных видна корреляция между сейсмической активностью и геоэлектрическими параметрами ММП. Следовательно, с помощью электромагнитного мониторинга можно следить за состоянием мерзлых пород, в том числе на участках, важных для хозяйственной деятельности населения.

Результаты мониторинга ВЭЗ (см. рис. 5) свидетельствуют, что УЭС проводящего мощного горизонта с УЭС в интервале 11–30 Ом·м также реагирует на сейсмические воздействия. Но, если рассматривать наблюдения за многолетнемерзлыми отложениями до глубин ≈ 100 м, в дальнейшем можно привлечь современный оперативный метод постоянного тока – электротомографию. Именно он дает возможность уменьшить временные затраты на полевые измерения и повысить детальность исследования за счет плотной сети наблюдений.

ВЫВОДЫ

Методы электроразведки, такие как ВЭЗ, электропрофилирование, нестационарное электромагнитное зондирование, широко используются в

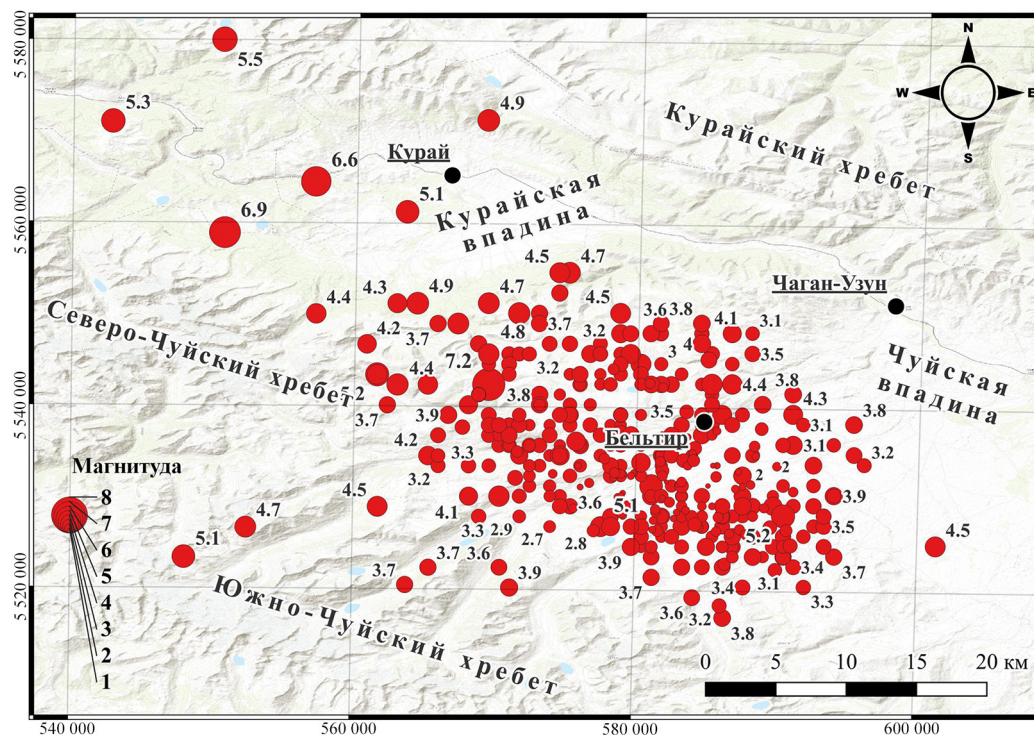


Рис. 4. Схема размещения эпицентров сейсмических событий в районе исследований за 2003–2019 гг.

Fig. 4. Layout of epicenters of seismic events in the study area for 2003–2019.

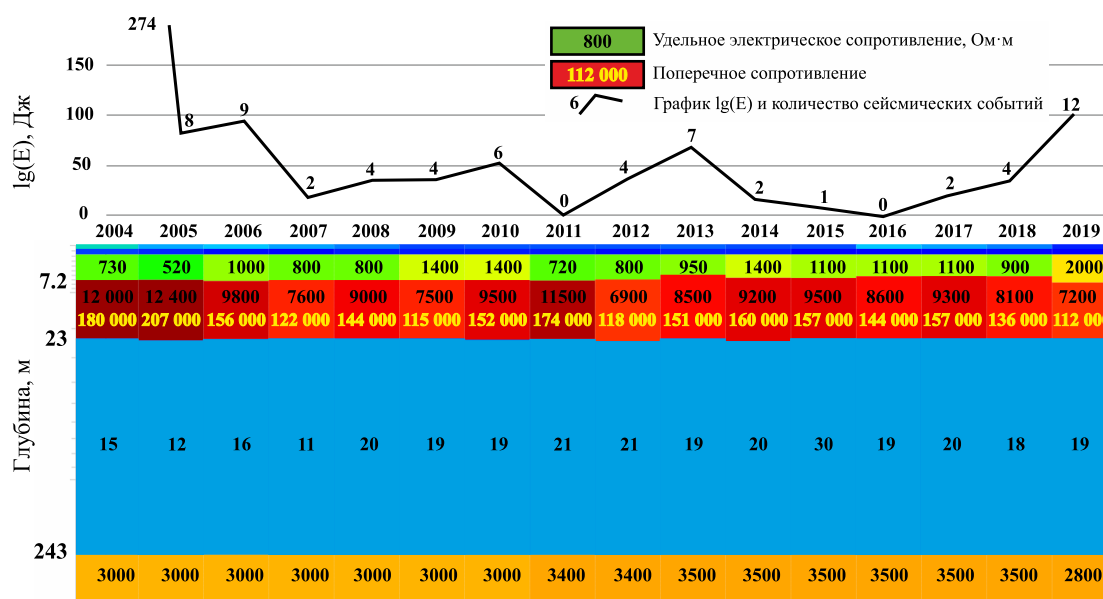


Рис. 5. Сопоставление количества сейсмической энергии с геоэлектрическими параметрами модели ВЭЗ № 9 за 2004–2019 гг. измерений в районе исследования.

На графике $\lg(E)$ подписано число землетрясений, происходящих в периоды сейсмических активизаций и затиший в афтершоковый период Чуйского землетрясения 2003 г.

Fig. 5. Comparison of the amount of seismic energy with the geoelectric parameters of the VES model No. 9 for 2004–2019 measurements in the study area.

The $\lg(E)$ graph shows the number of earthquakes occurring during periods of seismic activation and quiescence during the aftershock period of the 2003 Chuya earthquake.

областях распространения многолетнемерзлых толщ на территории Российской Федерации, о чем свидетельствует значительное число публикаций различных авторов (Нерадовский, 2017б, 2018; Панькова и др., 2020; Мурзина и др., 2022; Глинских и др., 2023). С помощью методов геоэлектрики можно не только оконтурить зоны развития ММП, но и определить их мощность, УЭС, глубину до верхней кромки, что позволяет далее наблюдать за их состоянием, используя количественные способы интерпретации.

В статье показано, что задачи картирования, диагностики и мониторинга криолитозоны весьма актуальны не только в полярных регионах, но и на территории межгорных заселенных впадинах Горного Алтая с развитой инфраструктурой. Объект исследования – Чуйская впадина – входит в зону, где происходят сильнейшие в регионе землетрясения с длительным афтершоковым периодом, а также последующие неотектонические процессы, такие как оползни, обвалы, новые сейсмодислокации, изменения в гидрогеологических процессах, например в дебете водоносных скважин.

Для интерпретации данных многолетних наблюдений методом ВЭЗ в западной части Чуйской впадины используется авторский подход, основанный на решении обратной задачи для каждого электрического зондирования, что позволяет по значениям значения УЭС и мощности ММП получать количественные оценки вариаций геоэлектрических параметров, достигающие 50% и более.

Результаты свидетельствуют, что на состояние многолетней мерзлоты может влиять сейсмическая активность исследуемой территории. С учетом того, что Чуйская впадина относится к артезианским бассейнам, причины изменения УЭС ММП в сторону понижения, скорее всего, связаны с активным перемещением подземных вод по разломам при усилении сейсмичности.

Так как доказано влияние температурных условий на зоны ММП (Лебедева и др., 2023), в принципе в сейсмоактивных районах необходимо наблюдать за двумя разными природными процессами.

Неразрушающий мониторинг методом ВЭЗ позволяет следить за состоянием мерзлоты на участках, важных для хозяйственной деятельности населения, а также на территориях с федеральными автотрассами, дорогами местного значения, трубопроводами, ЛЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтангэрэл Д., Цогбадрал Х. (2016) Исследование вечной мерзлоты гор Монгольского Алтая (на примере бассейна озера Цагаан-Нуур). *Науч. обозрение. Биол. науки*, (1), 47-50.
- Бабушкин С.М., Неведрова Н.Н. (2017) Аппаратурные и методические средства при поисках рудных месторождений методом нестационарного электромагнитного зондирования. *Международ. науч. конгр. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. Т. 4*. Новосибирск: СГУГиТ, 207-212.
- Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В.А. (2012) Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения. *Геофизика*, (6), 54-63.
- Буслов М.М., Имаев В.С. (2020) Модель формирования внутриконтинентальных деформаций Центральной Азии и закономерности проявления сейсмичности. *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)*. Мат.-лы совещ., вып. 18. Иркутск: ИЗК СО РАН, 41-44.
- Глинских В.Н., Федосеев А.А., Никитенко М.Н., Михайлов И.В., Бухтияров Д.А. (2023) Проектирование полевых экспериментов для обоснования технологии мониторинга мерзлых пород. *Криосфера Земли*, XXVII(4), 45-53. <https://doi.org/10.15372/KZ20230405>
- Дашевский Ю.А., Неведрова Н.Н., Жирова Н.В. (2000) Интегральная проводимость разреза как индикатор напряженного состояния среды при активном электромагнитном мониторинге на Южно-Байкальском прогностическом полигоне. *Докл. РАН*, 370(6), 807-809.
- Деев Е.В., Неведрова Н.Н., Зольников И.Д., Русанов Г.Г., Пономарев П.В. (2012) Геоэлектрические исследования отложений Чуйской котловины (Горный Алтай). *Геология и геофизика*, 53(1), 120-139.
- Дельво Д., Тениссен К., Ван-дер-Мейер Р., Берзин Н.А. (1995) Динамика формирования и палеостресс при образовании Чуйско-Курайской депрессии Горного Алтая: тектонический и климатический контроль. *Геология и геофизика*, 36(10), 31-51.
- Добрецов Н.Л., Буслов М.М., де Граве Й., Складаров Е.В. (2013) Взаимосвязь магматических, осадочных и аккреционно-коллизийных процессов на Сибирской платформе и ее складчатом обрамлении. *Геология и геофизика*, 54(10), 1451-1471.
- Доставалова М.С., Шитов А.В. (2011) Влияние метеорологических характеристик и геодинамической активности на режим образования гидрогенных наледей Горного Алтая. *Геориск*, (4), 36-43.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Дураченко А.А., Корabelщиков Д.Г., Гладышев Е.А. (2021) Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Алтай и Саяны. *Землетрясения России в 2019 году*. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 37-44.
- Ефремов В.Н. (2017) Возможности регистрации геофизических аномалий от талых водоносных зон и горизонтов в мерзлых породах. *Криосфера Земли*, XXI(6), 129-133. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(129-133\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(129-133))
- Железняк М.Н. (2005) Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 228 с.
- Лебедева Л.С., Баишев Н.Е., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М. (2023) Температура пород в слое годовых теплооборотов в районе распространения надмерзлотных таликов в Центральной Якутии. *Криосфера Земли*, XXVII(2), 3-15. <https://doi.org/10.15372/KZ20230201>

- Логачев Н.А. (1999) Главные структурные черты и геодинамика Байкальской рифтовой зоны. *Физ. мезомеханика*, **2**(1-2), 163-170.
- Масленников С.А. (1970ф) Гидрогеологические условия района Чуйской и Курайской степей (юго-восточная часть Горного Алтая). Отчет Тархатинской гидрогеологической партии за 1966–1970 гг. Новокузнецк.
- Мурзина Е.В., Поспеев А.В., Буддо И.В., Шарлов М.В., Семинский И.К., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А. (2022) Возможности малоглубинных нестационарных электромагнитных зондирований для выделения газогидратных скоплений в криолитозоне северных регионов Западной Сибири. *Криосфера Земли*, **XXVI**(2), 51-62. <https://doi.org/10.15372/KZ20220204>.
- Неведрова Н.Н., Дашевский Ю.А. (2000) Связь сейсмического режима с элементами активной тектоники по данным электромагнитных зондирований. *Сейсмология в Сибири на рубеже тысячелетий*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 173-178.
- Неведрова Н.Н., Деев Е.В., Пономарев П.В. (2017) Выявление разломных структур и их геоэлектрических характеристик по данным метода сопротивлений в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. (Горный Алтай). *Геология и геофизика*, **58**(1), 146-156. <https://doi.org/10.15372/GiG20170110>
- Неведрова Н.Н., Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Дашевский Ю.А., Дучков А.Д. (2001) Реконструкция глубинного строения Чуйской впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований. *Геология и геофизика*, **42**(9), 1399-1416.
- Нерадовский Л.Г. (2018) Количественная оценка объемной льдистости мерзлых грунтов методом дипольного электромагнитного профилирования. *Лед и снег*, **58**(1), 94-104. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-1-94-104>
- Нерадовский Л.Г. (2013) Опыт изучения влияния температуры на удельное электрическое сопротивление мерзлых грунтов. *Геофизика*, **1**, 67-70.
- Нерадовский Л.Г. (2017а) Региональная модель поведения температурного поля криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока: описание в искусственно создаваемых электромагнитных полях. *Криосфера Земли*, **XXI**(4), 12-22. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-4\(12-22\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-4(12-22))
- Нерадовский Л.Г. (2017б) Упрощенный подход изучения мерзлых грунтов методом дистанционного электромагнитного зондирования. *Геофизика*, **2**, 79-87.
- Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Михайлов И.В., Федосеев А.А. (2023) Математическое моделирование сигналов импульсного электромагнитного зондирования для мониторинга состояния многолетнемерзлых пород. *Геология и геофизика*, **64**(4), 591-600. <https://doi.org/10.15372/GiG2022132>
- Оленченко В.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Поспеева Е.В., Потапов В.В., Шеин А.Н., Стефаненко С.М. (2011) Распространение толщи мерзлых пород в Чуйской впадине (Горный Алтай) по данным электромагнитных зондирований. *Криосфера Земли*, **15**(1), 15-22.
- Панькова Д.С., Оленченко В.В., Цибизов Л.В., Камнев Я.К., Шеин А.Н., Синицкий А.И. (2020) Строение многолетнемерзлой толщи в пределах стационара Парисенто (п-ов Гыдан) по геофизическим данным. *Криосфера Земли*, **XXIV**(2), 52-67. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2\(52-67\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(52-67))
- Патрин А.А. (1991ф) Результаты поисковых геофизических работ по оценке угленосности кайнозойских отложений Аржанского, Междуреченского и Чуйского участков. Отчет Тургусунской партии за 1989–1991 гг. ТГФ, Горно-Алтайск.
- Печкин А.С., Романов А.Н., Калачев А.В., Красненко А.С. (2018) Сезонная динамика температурного режима тундровых почв Надымской провинции. *Науч. вестн. Ямало-Ненецкого автономного округа*, **1**(98), 34-39.
- Разумов С.О. (2015) Оценка современных темпов деградации многолетнемерзлых пород, тенденций и последствий ее развития в XXI в. *Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия*. Кемерово: науч.-издат. центр “Открытие”, 39-44.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ушанова Е.А. (2007) Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения. *Геотектоника*, (2), 3-22.
- Русанов Г.Г., Вазов С.В. (2014) Опорные разрезы четвертичных отложений Горного Алтая (Беле, Кубадру, Чаган). Бийск: ФГБОУ ВПО “АГАО”, 163 с.
- Туренко С.К., Дружинина К.В. (2018) О системном подходе к повышению эффективности исследований объектов криолитозоны геофизическими методами. *Нефть и газ*, (2), 27-31.
- Хабинов О.Г., Чалов И.А., Власов А.А., Антонов Е.Ю. (2009) Система интерпретации данных зондирования методом переходных процессов EMS. *ГЕО-Сибирь-2009*. Новосибирск: СГУГиТ, 108-113.
- Хрусталева Л.Н., Хилимонюк В.З. (2022) Прогноз аварийной ситуации по данным температурного мониторинга многолетнемерзлых грунтов вблизи подземного нефтепровода. *Криосфера Земли*, **XXVI**(3), 12-20. <https://doi.org/10.15372/KZ20220302>
- Шац М.М., Скачков Ю.Б. (2016) Климат Севера: Потепление или похолодание? *Климат и природа*, **2**(19), 27-37.
- Bartsch A., Strozzi T., Nitze I. (2023) Permafrost monitoring from space. *Surveys in Geophysics*, **44**, 1579-1613. <https://doi.org/10.1007/s10712-023-09770-3>
- Buddo I., Sharlov M., Shelokhov I., Misyurkeeva N., Seminsky I., Selyaev V., Agafonov Y. (2022) Applicability of transient electromagnetic surveys to permafrost imaging in Arctic West Siberia. *Energies*, **15**(5), 1-16. <https://doi.org/10.3390/en15051816>
- Cunningham K., Hatfield M., Pericon L.S. (2015) Unmanned aircraft systems for geotechnical monitoring of pipelines in the Arctic. *The Arctic Technology Conference*, Copenhagen: Curran Associates, Inc., 948-954.
- Fukui K., Fujii Y., Mikhailov N., Ostanin O., Iwahana G. (2007) The lower limit of mountain permafrost in the Russian Altai Mountains. *Permafrost Periglacial Processes*, **18**(2), 129-136. <https://doi.org/10.1002/ppp.585>
- Glinkikh V., Nechaev O., Mikhaylov I., Danilovskiy K., Olenchenko V. (2021) Pulsed Electromagnetic Cross-Well Exploration for Monitoring Permafrost and Examining the Processes of Its Geocryological Changes. *Geosci.*, **11**(2), 1-15. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020060>
- Lunina O.V., Gladkov A.V., Novikov I.S., Agatova A.R., Vysotskii E.M., Emanov A.A. (2008) Geometry of the

fault zone of the 2003 $M_s = 7.5$ Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai. *Tectonophysics*, **453**, 276-294. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.10.010>

Shalaginov A., Nevedrova N. (2024) Electromagnetic Monitoring During the Aftershock Period of the 2003 Chuya Earthquake in Gorny Altai: Measurement Technique and Results. *Geomag. Aeron.*, **64**(4), 569-580.
<http://eqru.gsras.ru>
<http://www.geotomosoft.com>
<http://zond-geo.ru>

REFERENCES

- Altangerel D., Tsogbadral Kh. (2016) Study of permafrost in the mountains of the Mongolian Altai (based on the Tsagaan-Nuur lake basin). *Nauch. Obozrenie. Biol. Nauki*, (1), 47-50. (In Russ.)
- Babushkin S.M., Nevedrova N.N. (2017) Equipment and methodological tools for searching for ore deposits using the non-stationary electromagnetic sounding method. *International Scientific Congress Interexpo GEO-Siberia-2017. V. 4*. Novosibirsk, SGUGiT Publ., 207-212. (In Russ.)
- Balkov E.V., Panin G.L., Manshtein Yu.A., Manshtein A.K., Beloborodov V.A. (2012) Electrical tomography: equipment, methodology, and application experience. *Geofizika*, (6), 54-63. (In Russ.)
- Bartsch A., Strozzi T., Nitze I. (2023) Permafrost monitoring from space. *Surveys in Geophysics*, **44**, 1579-1613. <https://doi.org/10.1007/s10712-023-09770-3>
- Buddo I., Sharlov M., Shelokhov I., Misyurkeeva N., Seminsky I., Selyaev V., Agafonov Y. (2022) Applicability of transient electromagnetic surveys to permafrost imaging in Arctic West Siberia. *Energies*, **15**(5), 1-16. <https://doi.org/10.3390/en15051816>
- Buslov M.M., Imaev V.S. (2020) Model of the formation of intracontinental deformations in Central Asia and patterns of seismicity manifestation. *Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent)*. Proceedings of the conference, vyp. 18. Irkutsk, IZK SO RAN Publ., 41-44. (In Russ.)
- Cunningham K., Hatfield M., Pericon L.S. (2015) Unmanned aircraft systems for geotechnical monitoring of pipelines in the Arctic. *The Arctic Technology Conference*, Copenhagen, Curran Associates, Inc., 948-954.
- Dashevskii Yu.A., Nevedrova N.N., Zhirova N.V. (2000) Integral conductivity of the section as an indicator of the stressed state of the medium in active electromagnetic monitoring at the South Baikal predictive polygon. *Dokl. RAN*, **370**(6), 807-809. (In Russ.)
- Deev E.V., Nevedrova N.N., Zol'nikov I.D., Rusanov G.G., Ponomarev P.V. (2012) Geoelectrical studies of the deposits of the Chui basin (Mountain Altai). *Geol. Geofiz.*, **53**(1), 120-139. (In Russ.)
- Del'vo D., Tenissen K., Van-der-Meier R., Berzin N.A. (1995) Dynamics of formation and paleostress during the formation of the Chuisko-Kurai depression in the Mountain Altai: tectonic and climatic control. *Geol. Geofiz.*, **36**(10), 31-51. (In Russ.)
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., de Grave I., Sklyarov E.V. (2013) Interrelationship of magmatic, sedimentary, and accretion-collision processes on the Siberian Platform and its folded framing. *Geol. Geofiz.*, **54**(10), 1451-1471. (In Russ.)
- Dostavalova M.S., Shitov A.V. (2011) The influence of meteorological characteristics and geodynamic activity on the regime of hydro-genic icing formation in the Mountain Altai. *Georisk*, (4), 36-43. (In Russ.)
- Efremov V.N. (2017) Opportunities for registering geophysical anomalies from thawed aquifer zones and horizons in permafrost rocks. *Kriosfera Zemli*, **XXI**(6), 129-133. (In Russ.) [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(129-133\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(129-133))
- Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G., Durachenko A.A., Korabel'shchikov D.G., Gladyshev E.A. (2021) Results of seismic monitoring of various regions of Russia. Altai and Sayans. *Earthquakes in Russia in 2019*. Obninsk, FiTs EGS RAN Publ., 37-44. (In Russ.)
- Fukui K., Fujii Y., Mikhailov N., Ostanin O., Iwahana G. (2007) The lower limit of mountain permafrost in the Russian Altai Mountains. *Permafrost. Periglac. Process.*, **18**(2), 129-136. <https://doi.org/10.1002/ppp.585>
- Glinkikh V.N., Fedoseev A.A., Nikitenko M.N., Mikhailov I.V., Bukhtiyarov D.A. (2023) Designing field experiments to justify the technology of permafrost monitoring. *Kriosfera Zemli*, **XXVII**(4), 45-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/KZ20230405>
- Glinkikh V., Nechaev O., Mikhaylov I., Danilovskiy K., Olenchenko V. (2021) Pulsed Electromagnetic Cross-Well Exploration for Monitoring Permafrost and Examining the Processes of Its Geocryological Changes. *Geosci.*, **11**(2), 1-15. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020060>
- Khabinov O.G., Chalov I.A., Vlasov A.A., Antonov E.Yu. (2009) System for interpreting sounding data using transient processes EMS. *GEO-Siberia-2009*. Novosibirsk, SGUGiT Publ., 108-113. (In Russ.)
- Khrustalev L.N., Khilimonyuk V.Z. (2022) Forecasting emergency situations based on temperature monitoring data of permafrost near an underground oil pipeline. *Kriosfera Zemli*, **XXVI**(3), 12-20. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/KZ20220302>
- Lebedeva L.S., Baishev N.E., Pavlova N.A., Efremov V.S., Ogonerov V.V., Tarbeeva A.M. (2023) Temperature of rocks in the layer of annual heat turnover in the area of the spread of super-permafrost thawing in Central Yakutia. *Kriosfera Zemli*, **XXVII**(2), 3-15. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/KZ20230201>
- Logachev N.A. (1999) Main structural features and geodynamics of the Baikal rift zone. *Fizich. Mezomekhanika*, **2**(1-2), 163-170. (In Russ.)
- Lunina O.V., Gladkov A.V., Novikov I.S., Agatova A.R., Vysotskii E.M., Emanov A.A. (2008) Geometry of the fault zone of the 2003 $M_s = 7.5$ Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai. *Tectonophysics*, **453**, 276-294. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.10.010>
- Maslennikov S.A. (1970f) Hydrogeological Conditions of the Chuya and Kurai Steppes Area (Southeastern Part of the Altai Mountains). Report of the Tarkhatinskaya Hydrogeological Party for 1966-1970. Novokuznetsk. (In Russ.)
- Murzina E.V., Pospeev A.V., Buddo I.V., Sharlov M.V., Seminskii I.K., Misyurkeeva N.V., Shelokhov I.A. (2022) Opportunities of shallow non-stationary electromagnetic soundings for identifying gas hydrate accumulations in the cryolithozone of the northern regions of Western Siberia. *Kriosfera Zemli*, **XXVI**(2), 51-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/KZ20220204>

- Neradovskii L.G. (2017b) A simplified approach to studying frozen soils using remote electromagnetic sounding method. *Geofizika*, (2), 79-87. (In Russ.)
- Neradovskii L.G. (2018) Quantitative assessment of the volumetric ice content of frozen soils using dipole electromagnetic profiling method. *Led i Sneg*, **58**(1), 94-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-1-94-104>
- Neradovskii L.G. (2013) Experience in studying the influence of temperature on the specific electrical resistance of frozen soils. *Geofizika*, (1), 67-70. (In Russ.)
- Neradovskii L.G. (2017a) Regional model of the thermal field behavior in the cryolithozone of Eastern Siberia and the Far East: description in artificially created electromagnetic fields. *Kriosfera Zemli*, **XXI**(4), 12-22. (In Russ.) [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-4\(12-22\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-4(12-22))
- Nevedrova N.N., Dashevskii Yu.A. (2000) Connection of seismic regime with elements of active tectonics from data of electromagnetic soundings. *Seismology in Siberia at the turn of the millennium*. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, 173-178. (In Russ.)
- Nevedrova N.N., Deev E.V., Ponomarev P.V. (2017) Identification of fault structures and their geoelectrical characteristics from resistivity method data in the epicentral zone of the Chui earthquake of 2003 (Mountain Altai). *Geol. Geofiz.*, **58**(1), 146-156. (In Russ.) <https://doi.org/DOI: 10.15372/GiG20170110>
- Nevedrova N.N., Epov M.I., Antonov E.Yu., Dashevskii Yu.A., Duchkov A.D. (2001) Reconstruction of the Deep Structure of the Chuya Basin in the Altai Mountains Based on Electromagnetic Sounding Data. *Geol. Geofiz.*, **42**(9), 1399-1416. (In Russ.)
- Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Mikhailov I.V., Fedoseev A.A. (2023) Mathematical modeling of impulse electromagnetic sounding signals for monitoring the state of permafrost rocks. *Geol. Geofiz.*, **64**(4), 591-600. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG2022132>
- Olenchenko V.V., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., Pospeeva E.V., Potapov V.V., Shein A.N., Stefansenko S.M. (2011) Distribution of Permafrost Thickness in the Chuya Basin (Altai Mountains) Based on Electromagnetic Sounding Data. *Kriosfera Zemli*, **15**(1), 15-22.
- Pan'kova D.S., Olenchenko V.V., Tsibizov L.V., Kamenev Y.K., Shein A.N., Sinitskii A.I. (2023) Structure of the permafrost section within the Parisento station (Gydan Peninsula) based on geophysical data. *Kriosfera Zemli*, **XXIV**(2), 52-67. (In Russ.) [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2\(52-67\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(52-67))
- Patrin A.A. (1991f) Results of Geophysical Exploration Work to Assess the Coal Potential of Cenozoic Deposits in the Arzhan, Mezhdurechensk, and Chuya Areas. Report of the Turgusun Party for 1989–1991. TGF, Gorno-Altaysk.
- Pechkin A.S., Romanov A.N., Kalachev A.V., Krasnenko A.S. (2018) Seasonal dynamics of the temperature regime of tundra soils in the Nadym province. *Nauchnyi Vestnik Yamalo-Nenetskogo Avtonomnogo Okruga*, **1**(98), 34-39. (In Russ.)
- Razumov S.O. (2015) Assessment of current degradation rates of permafrost rocks, trends, and consequences of their development in the XXI century. *Priorities of World Science: Experiment and Scientific Discussion*. Kemerovo, Scientific Publishing Center "Otkrytie", 39-44. (In Russ.)
- Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., Ushanova E.A. (2007) Tectonic position and geological manifestations of the Altai earthquake. *Geotektonika*, (2), 3-22. (In Russ.)
- Rusanov G.G., Vazhov S.V. (2014) Reference sections of Quaternary deposits in the Mountain Altai (Bele, Kubadru, Chagan). Biysk, FGBOU VPO "AGAO", 163 p. (In Russ.)
- Shalaginov A., Nevedrova N. (2024) Electromagnetic Monitoring During the Aftershock Period of the 2003 Chuya Earthquake in Gorny Altai: Measurement Technique and Results. *Geomag. Aeron.*, **64**(4), 569-580.
- Shats M.M., Skachkov Yu.B. (2016) Climate of the North: Warming or Cooling? *Klimat i Priroda*, **2**(19), 27-37. (In Russ.)
- Turenko S.K., Druzhinina K.V. (2018) On the systematic approach to improving the effectiveness of cryolithozone object research using geophysical methods. *Neft' i Gaz*, (2), 27-31. (In Russ.)
- Zheleznyak M.N. (2005) Geothermal Field and Cryolithozone of the Southeastern Siberian Platform. Novosibirsk, Nauka Publ., 228 p.
<http://eqru.gsr.ru>
<http://www.geotomosoft.com>
<http://zond-geo.ru>