

П. В. Пономарев^{2}, Н. Н. Неведрова¹*

Вариации геоэлектрических параметров многолетнемерзлых пород в долине р. Чаган Горного Алтая

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: petruss@bk.ru

Аннотация. Многолетние геофизические наблюдения выполняются в эпицентральной зоне разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г. ($M=7,3$) с продолжительным афтершоковым периодом, с 2004 года и по настоящее время. 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. Использование электромагнитных методов с контролируемым источником позволило выявить области развития многолетнемерзлых пород долине р. Чаган, не имеющие сплошного распространения, определена их мощность и удельное электрическое сопротивление. Результаты сопоставления параметра сейсмической активности территории с геоэлектрическими характеристиками мерзлоты показывают существенное влияние на них изменений сейсмического режима. В периоды активизаций многолетняя мерзлота деградирует, а с уменьшением активности начинает восстанавливаться, при этом вариации геоэлектрических параметров достигают 50-80 процентов. Показаны возможности применения электромагнитных методов, для регулярных наблюдений за состоянием многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова: сейсмоактивная зона Горного Алтая, Чуйская впадина, электромагнитные методы, мониторинг состояния многолетнемерзлых пород

P. V. Ponomarev^{2}, N. N. Nevedrova¹*

Geoelectric parameters variations of permafrost deposits in the Chagan river valley of the Altai Mountains

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Federal Research Center "Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences",
Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: petruss@bk.ru

Abstract. Long-term geophysical observations are carried out in the epicentral zone of the destructive Chuya earthquake of 2003 ($M=7.3$) with a long nonlinear aftershock period annually from 2004 to the present day. The epicenter of the earthquake was located between the Chuya and Kurai depressions of the Altai Mountains, just 15 km from the research site located in the western part of the Chuya depression in the Chagan river valley. The use of electromagnetic methods with a controlled source made it possible to identify areas of development of permafrost in the Chagan river valley that do not have a continuous distribution. Their thickness and electrical resistivity were determined. The results of comparing the parameter of seismic activity of the territory with the geoelectric character-

istics of the permafrost show a significant influence of changes in the seismic regime on them. During periods of activation, permafrost degrades, and with a decrease in activity begins to recover, while variations in geoelectric parameters reach 50-80 percent. The possibilities of using electromagnetic methods for regular monitoring of the state of permafrost rocks are shown.

Keywords: Seismically active zone of the Altai Mountains, Chui depression, electromagnetic methods, monitoring of the state of permafrost.

Введение

Большая часть российских территорий, занятых многолетней мерзлотой, находится за полярным кругом, но она присутствует и в горных регионах. Например, для Горного Алтая площадь развития мерзлоты значительна и составляет 910 км².

Считается, что на деструктивные процессы, связанные с мерзлотой, в первую очередь влияют температурные условия, и дискуссионная проблема изменения климата Земли в напрямую связана с исследованиями состояния многолетнемерзлых горных пород, современных темпов их деградации. 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 [1, 2]. Но в сейсмоактивных горных районах температурный фактор является не единственным. Повышение сейсмической активности приводит к образованию трещин, разгрузке криогенных вод в виде появления родников на поверхности, образованию наледей [3].

Эта статья посвящена комплексным геоэлектрическим исследованиям в долине р. Чаган, начатым вскоре после Чуйского землетрясения 2003 г. с магнитудой 7.3, и продолжающихся в настоящее время. По электромагнитным данным выяснено строение долины, выявлены области развития ММП, имеющие островной характер. Кроме того, по данным регулярных многолетних наблюдений имеется возможность проследить динамику изменений геоэлектрических параметров многолетней мерзлоты. Сопоставление данных геоэлектрики с характеристиками сейсмичности Чуйско-Курайской зоны позволяет выявить степень влияния на криолитозону происходящих сейсмических событий.

Методы и материалы

Наблюдения в долине р. Чаган выполняются после Чуйского землетрясения комплексом методов постоянного и переменного тока более 20 лет. В комплекс входят вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), электротомография (ЭТ), электромагнитные зондирования становлением поля (ЗСБ). Методом ВЭЗ получен основной объем полевых данных для построения геоэлектрических моделей долины и регулярных наблюдений, а с использованием метода электротомографии построены детальные разрезы до глубин 50-100 м в зонах имеющих разломов. Измерения в крестовых и круговых пунктах ВЭЗ, а также по отрезку профиля ВЭЗ 9-12 повторяются каждый год в летний период (рис.

1).

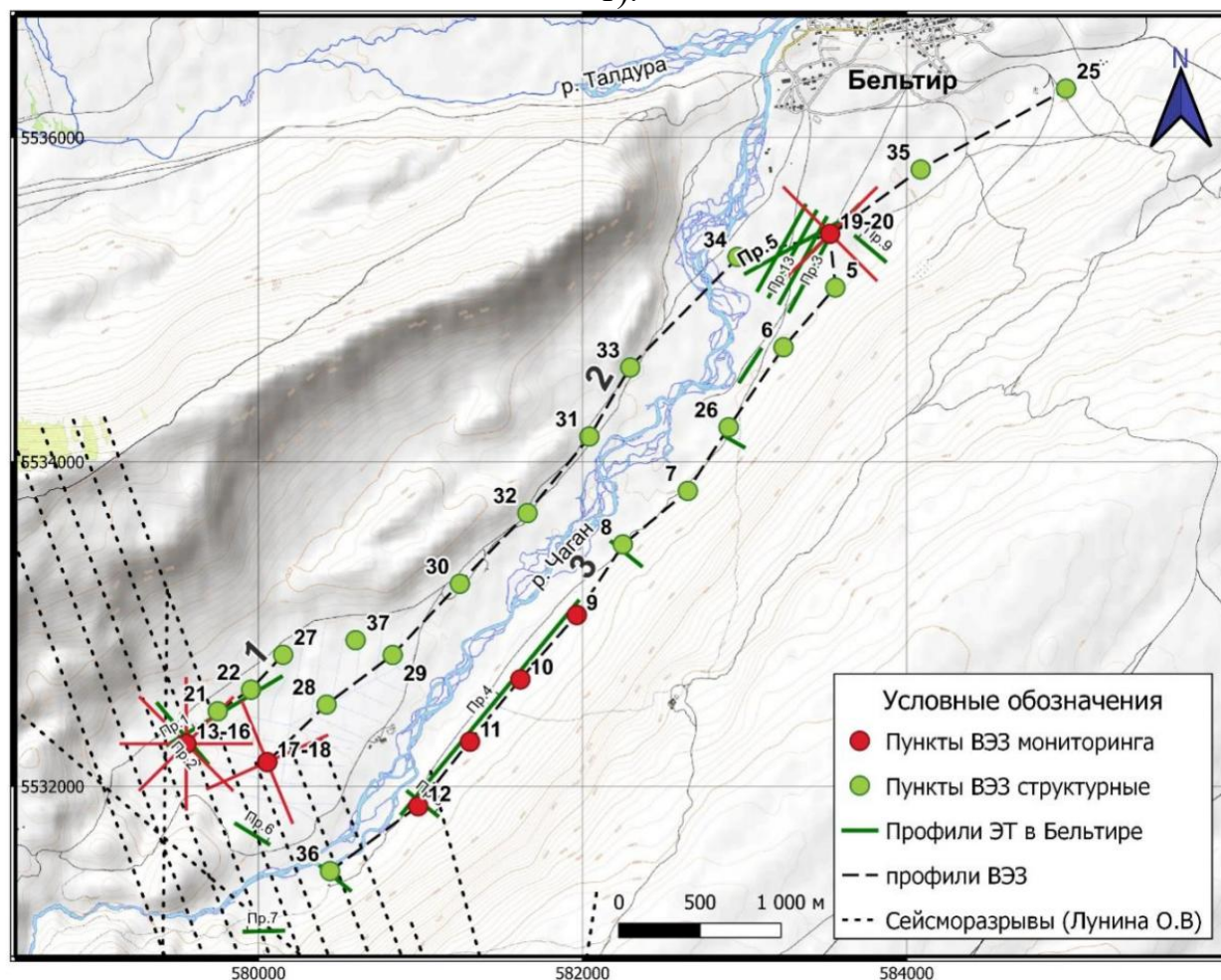


Рис. 1. Карта фактического материала наблюдений методами ВЭЗ и электротомографии в долине р. Чаган (западная часть Чуйской впадины Горного Алтая). Сейсморазрывы по Луниной О.В.[4]

Для полевых работ методом ВЭЗ используется электроразведочный генератор Астра-100 и измеритель SGD-ЕЕТ «MEDUSA». Измерения выполнялись с четырехэлектродной установкой Шлюмберже с максимальным размером генераторной линии $AB/2=1000$ м. С привлечением метода электротомографии получены наиболее детальные геоэлектрические параметры верхней части разреза наиболее сложно-построенных участков с присутствием многолетней мерзлоты и разломов. Работы методом ЭТ выполнены с помощью современной разработки ИНГГ СО РАН станции «Скала-48М» [5]. Длина стандартной расстановки ЭТ составляла 235 м с шагом в 5 м между электродами, использовались установки Шлюмберже и трехэлектродная.

Интерпретации всего объема полевых данных методов геоэлектрики основана на решении обратной задачи с использованием программных комплексов моделирования и инверсии: Geotomo Software, Zond Software, [6, 7]. В ходе интерпретации привлечены все возможные данные по имеющимся скважинам, ли-

толого-стратиграфические разрезы, что служило привязкой и обоснованием стартовых геоэлектрических моделей.

Результаты

На этапе обработки полевых данных ВЭЗ выявлены некоторые важные особенности строения долины. Интервалы в самой верхней части разреза с максимальными значениями УЭС (15000-20000 Ом·м) и мощностью от 15 м до 100-150 м по геолого-геофизическим данным [8], скорее всего, соответствуют зонам развития многолетней мерзлоты.

В целом геоэлектрические данные отражают разломно-блоковое строение участка исследования. Разломные нарушения выделяются на разрезах по данным одномерной интерпретации ВЭЗ значительными изменениями общей мощности осадочных пород (абсолютных отметок кровли фундамента) в соседних пунктах. На двумерных разрезах между соседними блоками наблюдаются зоны пониженных сопротивлений, скорее всего, соответствующие разломным структурам. По данным электротомографии, выявленные методом ВЭЗ разломы, подтверждаются своим продолжением в верхнюю часть разреза субвертикальными или наклонными более низкоомными зонами относительно вмещающей среды. Глубины исследования методом ЭТ составляют 50-100 м в зависимости от использованной установки.

В качестве примера рассмотрены двумерные геоэлектрические разрезы, полученные с помощью программных средств ZOND по протяженным профилям № 2 и № 3 ВЭЗ, выполненные с юго-запада на северо-восток по простирацию долины (рис. 2а, б). На обоих разрезах верхняя часть до глубин 20-150 м характеризует зональное распределение мерзлоты. В интервале профиля № 2 (ВЭЗ 34, 19, 35) выделяются два блока с разными глубинами проводящего горизонта до высокоомного основания, обозначенного на разрезах пунктирной линией.

Представленные разрезы по данным ВЭЗ демонстрируют, что многолетнемерзлые высокоомные породы не имеет сплошного распространения по площади долины. Максимальные мощности этих пород наблюдается в юго-западном замыкании долины и на северо-восточном отрезке профиля № 2, где они вскрыты скважинами недалеко от пос. Бельтир. В центральной части долины на профиле № 3 мощность ММП в основном менее значительна.

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 [9]. В качестве характеристик сейсмичности из опубликованных каталогов были получены данные о числе землетрясений и количестве выделившейся сейсмической энергии в районе исследований за каждый год.

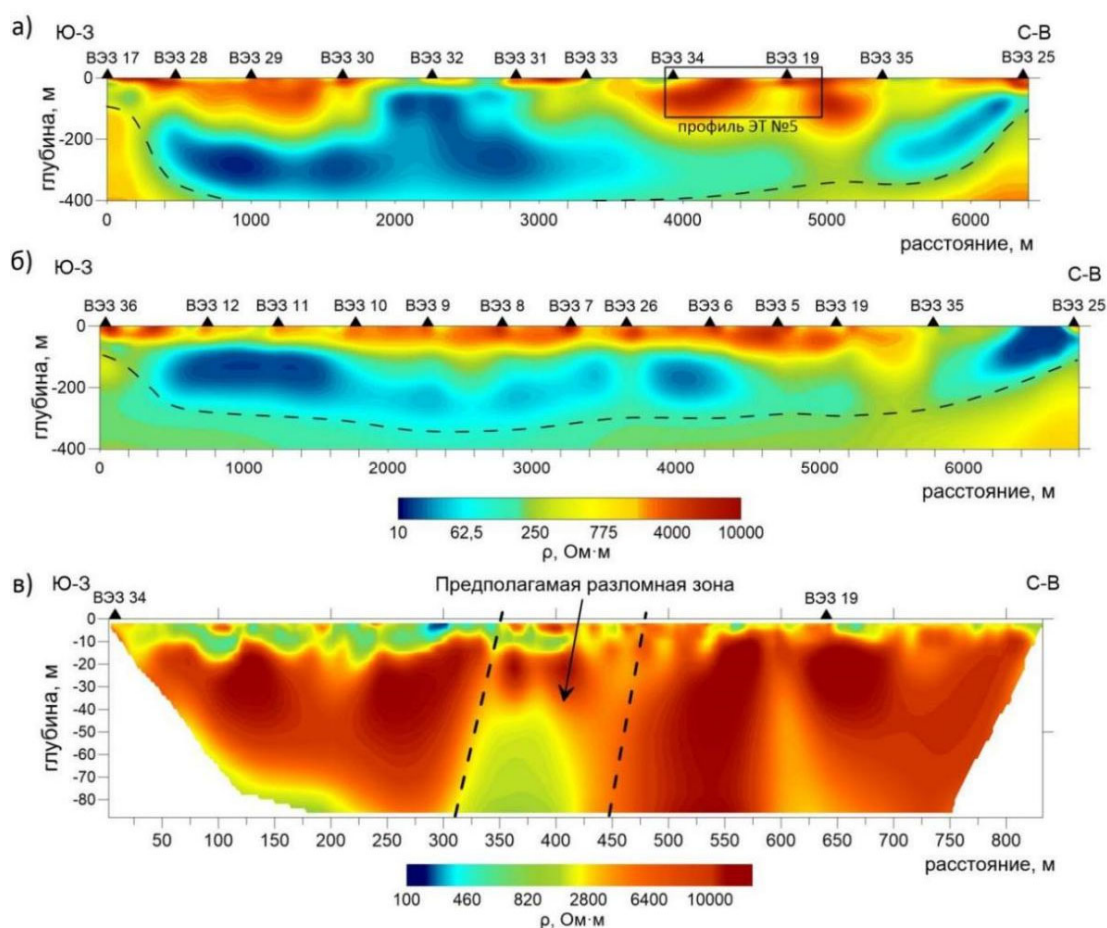


Рис. 2. Геоэлектрические разрезы в долине р. Чаган; а - по профилю № 2 ВЭЗ, б – по профилю № 3 ВЭЗ; в – по профилю № 5 электротомографии.

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 было получено эмпирически и обосновано теоретически при анализе результатов мониторинга методом ВЭЗ в Байкальской рифтовой зоне (дельта р. Селенга) [10, 11]. Известно, что в этой системе действует механизмом растяжения, вызванный в основном внутренними источниками энергии и преобладают сбросовые разломы [12].

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 [13, 14, 15]. Эта разница предполагает другие коэффициенты в уравнении регрессии. Для данной статьи коэффициенты уравнения подбирались таким образом, чтобы с одной стороны исключить слишком удаленные и имеющие низкий энергетический класс землетрясения, с другой необходимо было 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 котором содержится более 12000 событий, по приведенному выше критерию были выбраны 340 событий [16]. 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).

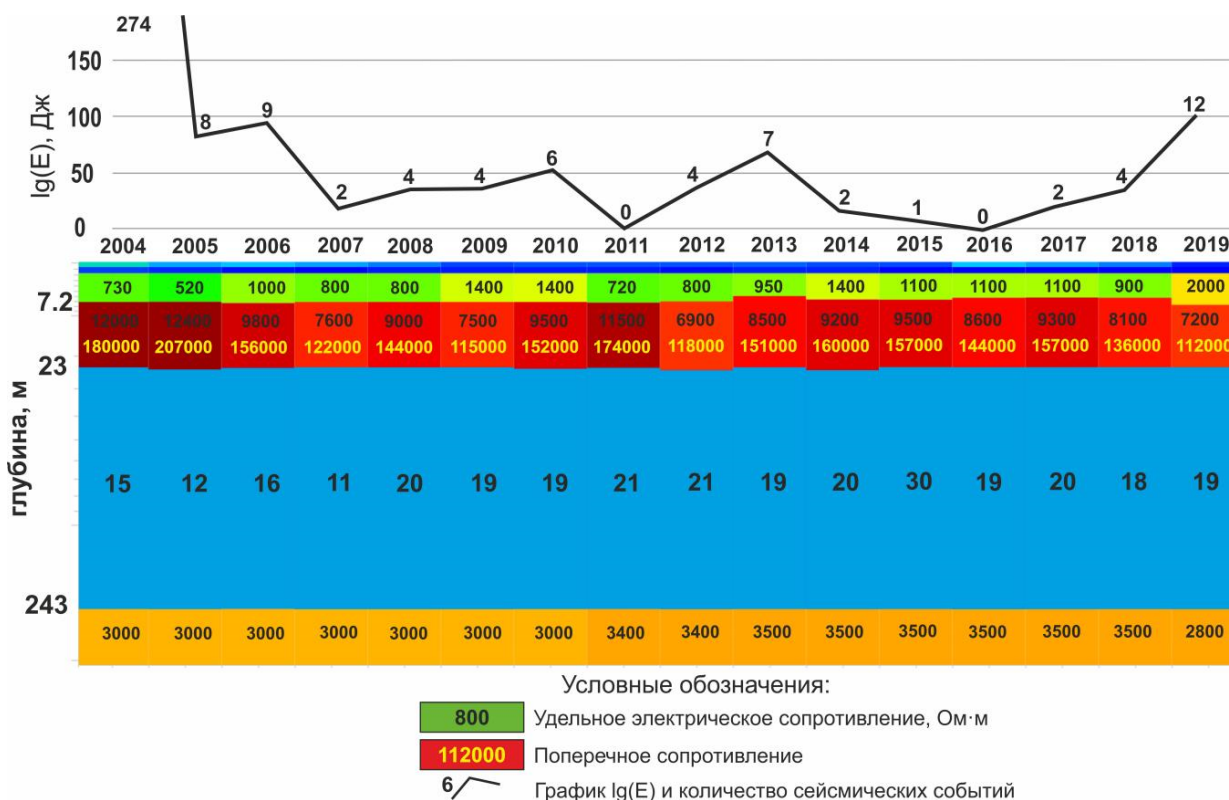


Рис. 3. Сопоставление количества сейсмической энергии с геоэлектрическими параметрами модели ВЭЗ № 9 за 2004-2019 годы измерений в районе исследования. На графике lg(E) подписано число землетрясений.

Для совместного анализа с данными ВЭЗ было использовано количество суммарной выделившейся сейсмической энергии (lg(E), Дж). На рис. 3 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.

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

Заключение

Возможность использования электромагнитных методов постоянного и переменного тока таких как ВЭЗ, электропрофилирование, электротомография, нестационарное электромагнитное зондирование в областях распространения многолетнемерзлых толщ на территории Российской Федерации обусловлена большим контрастом УЭС мерзлых и оттаявших горных пород [17]. С помощью методов геоэлектрики можно не только оконтурить зоны развития ММП, но и определить их мощность, УЭС, глубину до верхней кромки, и в режиме мониторинга контролировать их состояние. Полученные результаты свидетельствуют, что на состояние многолетней мерзлоты может влиять сейсмическая активность исследуемой территории. Учитывая, что Чуйская впадина относится к артезианским бассейнам, причины, скорее всего, связаны с активным перемещением подземных вод по разломам при усилении сейсмичности. Объект исследования – Чуйская впадина входит в зону, где происходят сильнейшие в регионе землетрясения, а также последующие неотектонические процессы, такие как оползни, обвалы, новые дислокации, изменения в гидрогеологических процессах, например, в дебитах водоносных скважин, появление грязевых вулканов (грифонов).

Количественные оценки параметров позволят эффективно наблюдать за изменениями геокриологических условий. Таким образом, электромагнитный неразрушающий мониторинг позволяет следить за состоянием мерзлоты на участках важных для хозяйственной деятельности населения, на территориях с федеральными автотрассами, дорогами местного значения, трубопроводами, ЛЭП.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0025.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разумов С.О. Оценка современных темпов деградации многолетнемерзлых пород, тенденций и последствий ее развития в XXI в. // В сборнике: Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия Материалы 8 международной научной конференции, научно-издательский центр «Открытие», 2015, с. 39-44.
2. Bartsch A., Strozzi T., Nitze I. Permafrost monitoring from space // *Surveys in Geophysics*, 2023, 35 p.
3. Доставалова М.С., Шитов А.В. Влияние метеорологических характеристик и геодинамической активности на режим образования гидрогенных наледей Горного Алтая // *Геориск*, 2011, №4, с. 36
4. Lunina O.V, Gladkov A.V., Novikov I.S., et al. A.A. Geometry of the fault zone of the 2003 $M_s = 7.5$ Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai // *Tectonophysics*, 2008, v. 453, p. 276-294.
5. Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В.А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // *Геофизика*, 2012, № 6, с. 54-63.
6. M.H. Loke, *Geotomo Software Pty Ltd*, 2015, [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.geotomosoft.com>

7. Каминский А. Е. Пакет программ ZOND [Электронный ресурс]. - URL: <http://zond-geo.ru>
8. Неведрова Н.Н., Деев Е.В., Пономарев П.В. Выявление разломных структур и их геоэлектрических характеристик по данным метода сопротивлений в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. (Горный Алтай) // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (1), с. 146-156.
9. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Дураченко А.А., Корабельщиков Д.Г., Гладышев Е.А. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Алтай и Саяны // Землетрясения России в 2019 году. Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2021, с. 37–44.
10. Дашевский Ю.А., Неведрова Н.Н., Жирова Н.В. Интегральная проводимость разреза как индикатор напряженного состояния среды при активном электромагнитном мониторинге на Южно-Байкальском прогностическом полигоне // Доклады РАН. 2000, т. 370, № 6, с. 807-809.
11. Неведрова Н.Н., Дашевский Ю.А. Связь сейсмического режима с элементами активной тектоники по данным электромагнитных зондирований // Сейсмология в Сибири на рубеже тысячелетий: материалы Междунар. конф.(Новосибирск, 27-29 сент. 2000). Новосибирск, 2000, с. 173-178.
12. Логачев Н.А. Главные структурные черты и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Физическая мезомеханика, 1999, т. 2, № 1-2, с. 163-170.
13. Буслов М.М., Имаев В.С. Модель формирования внутриконтинентальных деформаций Центральной Азии и закономерности проявления сейсмичности. // Материалы совещания Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту), Иркутск, Институт земной коры СО РАН, 2020, вып. 18, с. 41-44.
14. Дельво Д., Тениссен К., Ван-дер-Мейер Р., Берзин Н.А. Динамика формирования и палеостресс при образовании Чуйско-Курайской депрессии Горного Алтая: тектонический и климатический контроль // Геология и геофизика, 1995, т. 36, № 10, с. 31–51.
15. Добрецов Н.Л., Буслов М.М., де Граве Й., Склярков Е.В. Взаимосвязь магматических, осадочных и аккреционно-коллизийных процессов на Сибирской платформе и ее складчатом обрамлении // Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 10, с. 1451-1471.
16. База данных “Землетрясения России” // ФИЦ ЕГС РАН [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://eqru.gsras.ru/>
17. Панькова Д.С., Оленченко В.В., Цибизов Л.В., Камнев Я.К., Шеин А.Н., Синицкий А.И. Строение многолетнемерзлой толщи в пределах стационара Парисенто (п-ов Гыдан) по геофизическим данным // Криосфера Земли, 2023, XXIV, №2, с. 52-67.

© П. В. Пономарев, Н. Н. Неведрова, 2024