

Научная статья

УДК 550.837.31+550.8.05

DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-3-32-45

Развитие программно-алгоритмических средств для обработки и интерпретации данных мониторинга методом электротомографии

**Нина Николаевна Неведрова^{1,2}, Александр Евгеньевич Шалагинов^{1,3},
Аркадий Вадимович Мариненко¹, Илья Олегович Шапаренко^{1,2}**

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН

²Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

¹NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

²ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru

³MarinenkoAV@ipgg.sbras.ru

⁴ShaparenkoIO@ipgg.sbras.ru

Аннотация

Метод электротомографии с каждым годом все более широко применяется для решения самых разных задач. Например, в археологических раскопках, в задачах контроля хвостохранилищ, инженерных изысканиях, для изучения разломных структур, мониторинговых исследований в сейсмоактивных районах. Для формирования подходов к решению проблемы прогнозирования сейсмических событий необходимо выполнять достаточно длительные наблюдения, что приводит к необходимости рассматривать большие массивы исходных данных, интерпретировать значительный объем полевых материалов. В связи с этим актуально применение и развитие современных компьютерных средств обработки и интерпретации результатов регулярных наблюдений. Целью данной работы является модернизация и развитие программного комплекса решения прямых и обратных задач Direct-Inverse-Solver (DiInSo) для обработки, интерпретации и анализа данных мониторинга методом электротомографии.

Ключевые слова

электромагнитный мониторинг, электротомография, численная инверсия, программно-алгоритмические средства

Финансовая поддержка

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

Для цитирования

Неведрова Н. Н., Шалагинов А. Е., Мариненко А. В., Шапаренко И. О. Развитие программно-алгоритмических средств для обработки и интерпретации данных мониторинга методом электротомографии // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2023. Т. 21, № 3. С. 32–45. DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-3-32-45

© Неведрова Н. Н., Шалагинов А. Е., Мариненко А. В., Шапаренко И. О., 2023

ISSN 1818-7900 (Print). ISSN 2410-0420 (Online)

Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2023. Том 21, № 3

Vestnik NSU. Series: Information Technologies, 2023, vol. 21, no. 3

Software and Algorithmic Tools Development for Processing and Interpretation Electrotomography Monitoring Data

Nina N. Nevedrova^{1, 2}, Alexandre E. Shalaginov^{1, 3},
Arkadiy V. Marinenko¹, Igor O. Shaparenko^{1, 2}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS

²Novosibirsk State University

³Novosibirsk State Technical University

¹NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

²ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru

³MarinenkoAV@ipgg.sbras.ru

⁴ShaparenkoIO@ipgg.sbras.ru

Abstract

Year by year researchers use the method of electrotomography more extensively to solve a wide variety of tasks. For example, electrotomography can be applied in archaeological excavations, in the tasks of controlling mine tailings, in engineering surveys, to study fault structures, for monitoring studies in seismically active areas. It is necessary to perform sufficiently long-term observations to form approaches in solving the problem of predicting seismic events. This leads to the need to consider large arrays of initial data and interpret a significant amount of field data. In this regard, it is important to use and develop modern computer tools for processing and interpreting the results of regular observations. The purpose of this work is to modernize and develop the Direct-Inverse-Solver (DiInSo) software package for solving direct and inverse problems for processing, interpreting and analyzing electrotomography monitoring data.

Keywords

electromagnetic monitoring, electrotomography, numerical inversion, software and algorithmic tools.

Funding

The study was funded by the Russian Science Foundation № 23-27-10050, <https://rscf.ru/project/23-27-10050/>

For citation

Nevedrova N. N., Shalaginov A. E., Marinenko A. V., Shaparenko I. O. Software and algorithmic tools development for processing and interpretation electrotomography monitoring data. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2023, vol. 21, no. 3, pp. 32–45. DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-3-32-45

Введение

Проблема прогнозирования напряженного состояния земных недр, приводящего к катастрофическим событиям (землетрясениям, оползням), является актуальной не только для сейсмоактивных регионов, но и для территорий с экстремальными техногенными воздействиями на окружающую среду. Эта проблема относится к крайне сложным, и пока нет единого подхода к ее решению. Но все-таки принципиальная возможность прогноза имеется, она основана на факте не внезапности землетрясения, существовании периода подготовки, проявляющегося в предвестниках [1–3].

Длительные многолетние наблюдения на прогностических полигонах России, Киргизии, Таджикистана, Китая и в других странах показали, что действительно наблюдаются вариации геофизических полей, в том числе и электромагнитных, связанные с процессами подготовки сейсмических событий [4–8]. Обнаруженные предвестники многочисленны, их насчитывается примерно несколько сотен, что, скорее всего, отражает индивидуальность их набора для каждого отдельного сценария подготовки конкретного события. Формирование геофизических предвестников будет зависеть в значительной степени от геологического строения массива горных пород конкретного сейсмоактивного района, выбора методов исследования, оптимальности размещения наблюдательных пунктов, периодичности измерений.

В Китайской республике много лет поддерживается государственная программа сейсмобезопасности. Используемый комплекс геофизических методов включает электромагнитные измерения. Анализ результатов показал, что к одному из эффективных прогностических наблюдений относится мониторинг на постоянном токе [9–12]. В Китае известны факты успешного прогноза землетрясений. Наиболее впечатляющим является предупреждение о Хайченском землетрясении (4 февраля 1975 г., $M = 7,3$). Китайские ученые в результате анализа геофизических предвестников пришли к выводу о большой вероятности сильного землетрясения. В результате за несколько дней до катастрофы были эвакуированы и спасены несколько тысяч жителей г. Хайчен провинции Хэбэй [13].

В России и на постсоветском пространстве именно электромагнитный мониторинг получил значительное развитие. Под этим термином понимают повторяемые с определенной периодичностью систематические наблюдения за электромагнитным полем с целью выявления временной динамики электромагнитных характеристик изучаемого сейсмоактивного региона [14]. Превалирующее применение электромагнитных методов с контролируемыми источниками (активный мониторинг) объясняется высокой точностью измерений, хорошо разработанной теоретической, аппаратной, программно-алгоритмической интерпретационной базой. Эти методы обладают высокой чувствительностью к изменению напряженно-деформированного состояния геологической среды, что подтверждено многочисленными лабораторными и натурными испытаниями [15–21]. Для активного мониторинга используются такие методы, как зондирование становлением электромагнитного поля (ЗС), вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и в последние годы электротомография (ЭТ). Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, в первую очередь, они обладают разной глубинностью исследования, чувствительностью и разрешающей способностью. Электротомография, благодаря высокой детальности метода и относительной простоте использования, позволяет решать широкий круг задач, включая электромониторинг.

Принципиальным является вопрос дальнейшей обработки и интерпретации полученных полевых данных. Для интерпретации данных регулярных наблюдений указанными методами авторы статьи применяют подход, основанный на решении обратных задач геоэлектрики, в результате которого получают количественные оценки вариаций геоэлектрических параметров, предвещающих сейсмические события. При этом для каждого регулярного измерения восстанавливается геоэлектрическая модель – в основном одномерная для зондирований ЗСБ, ВЭЗ и 2D/3D в случае применения электротомографии. В полученных моделях можно выделить интервалы, максимально чувствительные к сейсмическому воздействию. Далее, опираясь на особенности строения, можно установить закономерности изменения геоэлектрических параметров и их связь с сейсмическими событиями путем сопоставления с характеристиками сейсмичности [22–24].

Очевидно, что для формирования подходов к решению проблемы прогнозирования сейсмических событий, для выявления прогностических критериев необходимо выполнять достаточно длительные наблюдения в сейсмоактивном районе, что приводит к необходимости далее рассматривать большие массивы исходных данных, интерпретировать значительный объем полевых материалов. В связи с этим актуально применение и развитие современных компьютерных средств обработки и интерпретации результатов регулярных наблюдений.

Целью данной работы является модернизация и развитие программных средств моделирования и инверсии для обработки, интерпретации и анализа данных мониторинга методом электротомографии. В статье будут рассмотрены возможности комплекса Direct-Inverse-Solver (DiInSo). Этот комплекс, предназначенный ранее для решения прямых 3D- и обратных 2D/3D-задач электротомографии, был дополнен графом обработки данных мониторинга на основе теоретического анализа разных схем регуляризации. В статье опробована новая версия DiInSo, приведены примеры интерпретации полевых данных мониторинга с помощью этой программы. Данные получены в районе Горного Алтая, который относится к наиболее сейсмо-

активным заселенным районам России и в настоящее время является зоной рекреации и туризма с хорошо развитой инфраструктурой. Исследования, связанные с сейсмобезопасностью этой территории, актуальны. Измерения ЭТ выполняются на участках межгорных впадин Горного Алтая с присутствием разломных структур. Регулярные наблюдения этим методом именно в зонах разломов позволяют по величине вариаций выделить активные и потенциально сейсмогенерирующие структуры, в зоне влияния которых может произойти разрушительное землетрясение.

Программные средства обработки и интерпретации данных электротомографии

В настоящее время электротомография относится к наиболее востребованной модификации методов постоянного тока и позволяет решать широкий круг актуальных задач. ЭТ имеет ряд преимуществ по сравнению с классическими методами вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) и электропрофилированием. В электротомографии используется многоэлектродная система наблюдений, в которой каждый электрод может быть как генераторным, так и измерительным. При этом ускоряется процесс измерений и реализуется высокая плотность полевых данных, обеспечивающая детальность исследования, особенно в горизонтальном направлении, что позволяет существенно уточнить геоэлектрические характеристики верхней части разреза. В последние несколько лет электротомография используется в задачах мониторинга [24–26].

Для интерпретации данных ЭТ, благодаря популярности метода, существует целый ряд зарубежных и российских программных комплексов. В конце прошлого столетия наиболее востребованными являлись программы Res2-3D компании *Geotomo Software*, Малайзия¹, *ERTLab* (*Multi-Phase Technologies, LLC*, США и *Geostudi sAtier s.r.l.*, Италия). Далее начинают развиваться российские разработки. Можно, например, отметить пакет программ *Zond*, включающий интерпретацию данных ЭТ².

В Институте нефтегазовой геологии и геофизики (ИНГГ СО РАН) в последнее время разработаны собственные программные средства с учетом современных достижений в алгоритмах и интерфейсах. В статье будут рассмотрены возможности многофункционального комплекса *DiInSo*³. Собственные программные разработки позволяют постоянно расширять их функциональные возможности, адаптировать к конкретным полевым данным электротомографии.

Программный комплекс DiInSo для исследования строения и мониторинга методом электротомографии

Изначально этот программный комплекс предназначен для решения прямых 3D- и обратных 2D/3D-задач электротомографии на постоянном токе. *DiInSo* написан на языке C/C++ с применением многопоточных алгоритмов, что позволяет максимально использовать мощность вычислительной машины. Несмотря на оконный Windows-интерфейс, программный код не имеет жесткой привязки к операционной системе, что дает возможность при необходимости откомпилировать программу под другие современные системы, включая Linux-подобные.

Прямая задача подразумевает, что нам известно геологическое строение исследуемой области и мы хотим оценить эффективность той или иной электродной установки (или нескольких установок) для работы в этой области. Прямая задача начинается с построения модели исследуемой области и разбиения этой модели на конечные элементы – тетраэдры. Сделать

¹ См.: *Geotomo Software*: <http://geotomosoft.com/>

² См.: *Zond-geo*: <http://zond-geo.com/>

³ См.: <http://diinso.sourceforge.net>

это можно с помощью стороннего программного обеспечения, большинство которого является бесплатным. Построив сетку, необходимо задать положения генераторно-приемной установки – АВМН на этой сетке. Положение электродов должно совпадать с узлами сетки. Положения установки АВМН можно задать как в автоматическом режиме, так и вручную. При задании положений установки в автоматическом режиме на выбор предлагаются следующие типы установок: Веннер-Альфа, Веннер-Бета, Шлюмберже, Поль-Диполь, Диполь-Диполь. В ручном режиме можно задавать любые четырехэлектродные установки.

Решение прямых задач осуществляется узловым методом конечных элементов на базисных функциях первого порядка. Для решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) доступны следующие итерационные решатели: CG, CR, GMRES, FGMRES, BiCGStab, IDR, DPCG, AMG. К большинству из решателей может быть применена процедура предобуславливания. Процесс решения СЛАУ является параллельным, и в зависимости от возможностей компьютера могут быть использованы технологии OpenCL, OpenMP или Nvidia CUDA.

Обратная задача подразумевает, что у нас есть некоторое множество измерений электротомографии, по которому требуется восстановить геологическое строение среды. Обратные задачи могут решаться как в 2D-постановках (один профиль), так и в 3D (множество профилей). В процессе решения обратной задачи также требуется построение сетки – треугольной в 2D-случае и тетраэдральной в 3D-случае. Сетка при этом строится автоматически, но пользователь может контролировать мелкость и сгущение конечных элементов в области моделирования. Тип используемых установок может быть произвольным, единственное условие – установка должна быть четырехэлектродной. При необходимости реализовать достаточно популярные трехэлектродные, двухэлектродные установки один из питающих и один из приемных электродов могут находиться на условной бесконечности, т. е. на достаточно большом расстоянии, чтобы практически не влиять на измерения.

Для инверсии используется схема Гаусса – Ньютона. Важно знать, что при выполнении инверсии в автоматическом режиме для нее заданы стандартные параметры. Но опыт работы с программой показывает, что для получения оптимального решения лучше использовать возможность изменять некоторые из настроек. Укажем наиболее важные из них. Пользователь может выбрать параметр регуляризации, его значение позволяет в ряде случаев выделить поисковый объект с лучшим контрастом, усилить контрастность подобластей для обнаружения слабоконтрастных объектов, использовать для решения выбросоустойчивый (робастный) метод, учесть топографический эффект, ограничить решение некоторым диапазоном значений сопротивления, включить в модель априорную информацию о геологической среде.

Программа DiInSo имеет набор встроенных визуализаторов, позволяющих сделать предварительную оценку как для входных данных, так и полученного результата. Необходимо отметить, что входные данные могут быть конвертированы из других программных комплексов во внутренний формат DiInSo, а полученный результат может быть визуализирован в сторонних программных пакетах. Для освоения программы DiInSo в комплекте идет подробная документация на двух языках – русском и английском. Кроме классических задач электротомографии, существует возможность решения задач скважинной электротомографии, электротомографии внутри замкнутого контура (например, цилиндра).

Комплекс DiInSo протестирован на реальных полевых данных. С его помощью выполнена интерпретация значительного объема полевых данных электротомографии, полученных на участках крупных межгорных впадин Горного Алтая (Чуйской, Курайской, Уймонской) с целью выяснения строения, присутствия разломных структур [26; 27]. В качестве примера приведен разрез с разломной зоной в Чуйской впадине (рис. 1). В результате инверсии полевых данных ЭТ разломная зона выделяется на разрезе практически вертикальным блоком с пониженными значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) в интервале профиля ~ от 100 до 140 м, ее ограничивают с двух сторон блоки высокоомных отложений.

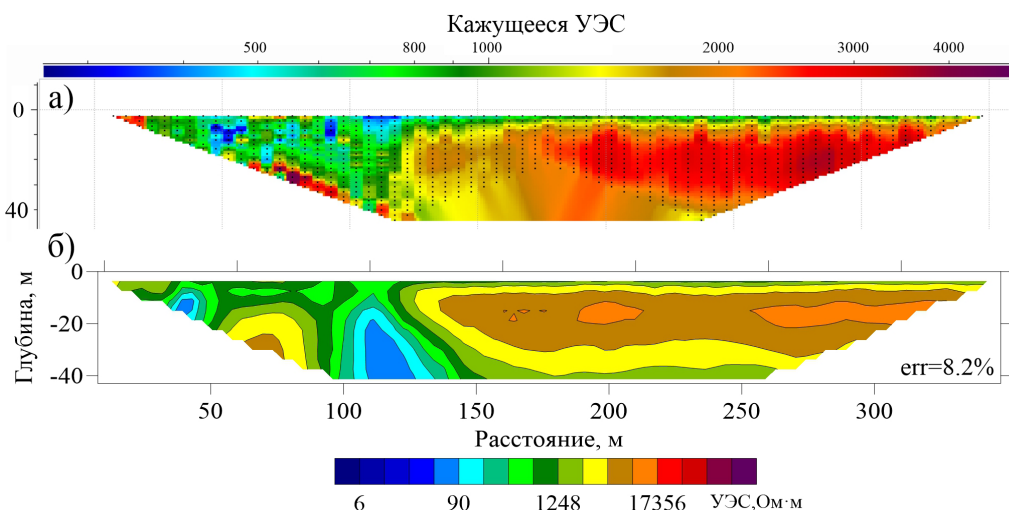


Рис. 1. Геоэлектрический разрез с разломной зоной по данным электротомографии на участке Мухор-Тархата в Чуйской впадине Горного Алтая:

а – распределение кажущегося удельного электрического сопротивления (нормированный измеренный сигнал); б – геоэлектрический разрез в результате инверсии полевых данных с помощью программы DiInSo, невязка – 8,2 %

Fig. 1. Geoelectric section with a fault zone according to electrotomography data at the Mukhor-Tarkhat site in the Chui depression of the Altai Mountains:

а – distribution of apparent resistivity (normalised measured signal); б – geoelectric section as a result of field data inversion using DiInSo programme, 8.2 % mismatch

Сравнительный анализ результатов моделирования и инверсии, выполненной комплексами Res2D, Zond, DiInSo, показал преимущества последнего в выявлении строения разломных зон в сейсмоактивных районах [27].

DiInSo для регулярных наблюдений

Как уже отмечалось, для полноценной интерпретации данных регулярных наблюдений за изменением геоэлектрических параметров горных пород методом электротомографии необходимы специализированные эффективные программные средства. Поэтому в настоящее время комплекс *DiInSo* был дополнен графом обработки данных мониторинга на основе выбора оптимальной схемы регуляризации. Для таких наблюдений можно также ввести термин «интервальная электротомография», который используется в иностранных публикациях. Суть в том, что мы повторяем измерения по профилю или системе профилей в одной и той же области с определенной периодичностью, т. е. через некоторые временные интервалы. Периодичность измерений подбирается эмпирическим путем. В частности, в сейсмоактивном районе она будет зависеть от уровня сейсмической активности на момент измерений, геоэлектрических характеристик выбранного участка.

Конечная цель интерпретации состоит в том, чтобы адекватно отобразить изменения удельного электрического сопротивления геологической среды по профилю либо в трехмерной модели. Фактически анализируются временные вариации УЭС для каждой конкретной геоэлектрической модели в разные моменты времени, причем необходимо получить количественную оценку этих изменений. Для этого важно подобрать соответствующие схемы регуляризации.

Обычная инверсия в таких случаях, как правило, некорректна, неуникальна и требует дополнительных ограничений. Вопрос в том, как эти ограничения оптимально выбрать. Существует ряд факторов, которые будут влиять на результат и которые определяют применимость и эффективность существующих подходов. К этим факторам можно отнести следующие:

- 1) контраст и неоднородность модели, выбранной в качестве фоновой;
- 2) форма и контраст изменений удельного электрического сопротивления при повторных измерениях;
- 3) повторяемость положений электродов и установок;
- 4) структура ошибок в целом и корреляция между соседними по времени измерениями;
- 5) скорость протекающих процессов в области измерений;
- 6) целевые значения, т. е. абсолютные или относительные изменения удельного электрического сопротивления или возможно каких-либо вторичных параметров, например, водонасыщенности, влажности, глинистости.

Можно выделить пять основных типов минимизации функционала для «интервальной электротомографии» ($\mathbf{d}$ – вектор данных, $\mathbf{m}$ – искомый вектор, ρ – величины сопротивлений (символ α означает кажущиеся сопротивления), $\mathbf{f}(\mathbf{m})$ – отклик модели, t – временной шаг):

1. Отдельная инверсия каждого временного шага: $\mathbf{d}^n = \{\log \rho_\alpha(t = t_n)\} \rightarrow \mathbf{m}^n = \rho^n$.
2. Инверсия соотношений данных [28]: $\mathbf{d}^n = \rho_\alpha^n / \rho_\alpha^0 \rightarrow \mathbf{m}^n = \{\rho^n / \rho^0\}$.
3. Инверсия с исходной моделью $\mathbf{m}^0$ заданной как $\mathbf{m}^n - \mathbf{m}^0$ (или альтернативный вариант $\mathbf{m}^n - \mathbf{m}^{n-1}$).
4. Так называемая «разностная инверсия после» («difference inversion after») которая дополнительно исправляет несоответствие в t_0 : $\mathbf{d}^n = \{\rho_\alpha^n / \rho_\alpha^0\} \mathbf{f}(\mathbf{m}^0)$ (или $n-1$ вместо 0) [29].
5. 4D-инверсия, в которой учитываются все связи – по пространству и по времени. Обычно 4D-инверсия делается под конкретную задачу с учетом ее особенностей.

Поскольку первый из представленных вариантов является по сути обычной инверсией, второй вариант применяется только при малых изменениях модели данных, а пятый вариант требует большого количества априорных данных, в программе DiInSo предоставляются на выбор третий или четвертый варианты для интерпретации данных мониторинга методом электротомографии.

Практическое использование программных средств DiInSo для мониторинга

Рассмотрим практические примеры интерпретации данных мониторинга методом электротомографии, полученных в Горном Алтае, с помощью программы DiInSo. Район Уймонской межгорной впадины относится к сейсмоопасным. Об этом свидетельствуют сильные исторические землетрясения в Теректинской разломной зоне с магнитудами 7,4 – 7,7. В настоящее время регулярно регистрируются многочисленные землетрясения с магнитудами до 4,5, происходящие в районе впадины и в обрамляющих ее горных хребтах. Таким образом, сейсмологические данные указывают на повышенную активность разломов этой территории в течение длительного временного периода [30].

Теректинская зона разломов хорошо выражена в рельефе одноименного горного хребта, ограничивающего впадину с севера. По данным бурения и электроразведки установлено надвигание этого хребта на впадину, выраженное серией уступов по его склону. Регулярные наблюдения методом электротомографии за геоэлектрическими характеристиками горных пород выполняются в Уймонской впадине на двух участках Теректинской разломной зоны в районе поселков Баштала и Маргала. Выбор мест измерений обусловлен анализом геологических и сейсмологических данных.

Тектонический уступ у поселка Баштала также образовался в результате надвигания Теректинского хребта в южном направлении на впадину. Профиль ЭТ проходит через этот уступ и далее через зону разлома в виде надвига. Активность разлома подтверждается наличием цепочек мелких источников, образующих заболоченные участки. Вблизи пос. Маргала, где проходит второй профиль ЭТ, пробурены две скважины, по данным которых был сделан вывод

о наличии крутопадающего взброса у подножия Теректинского хребта, в результате чего метаморфические сланцы протерозоя надвинуты на глинистые породы, предположительно, неогенового возраста [31]. Измерения по профилям Баштала и Маргала повторяются практически ежегодно.

Интерпретации измерений выполняется с помощью программы DiInSo. В качестве одного из примеров выбраны и сопоставлены данные по профилю Баштала за 2017 и 2019 гг. (рис. 2). Два верхних разреза на рис. 2 получены в результате инверсии полевых данных электротомографии, полученных в 2017 и 2019 гг. Красной штрихпунктирной линией показан предполагаемый сместитель разлома. В данном случае высокоомные отложения (красные цвета) с УЭС до 600 Ом·м надвинуты на низкоомные, УЭС которых более чем на порядок меньше. По третьему нижнему разрезу, отражающему отношение значений УЭС за разные годы, можно сделать заключение о ширине той части разломной зоны, в которой происходит самое значительное изменение значений УЭС (интервал профиля ~ от 30 до 80 м). Хорошо видно, что значения УЭС в глубину разлома изменяются неравномерно – максимально в самой верхней части разреза. Это связано с сильным влиянием многочисленных водных источников в зоне разлома.

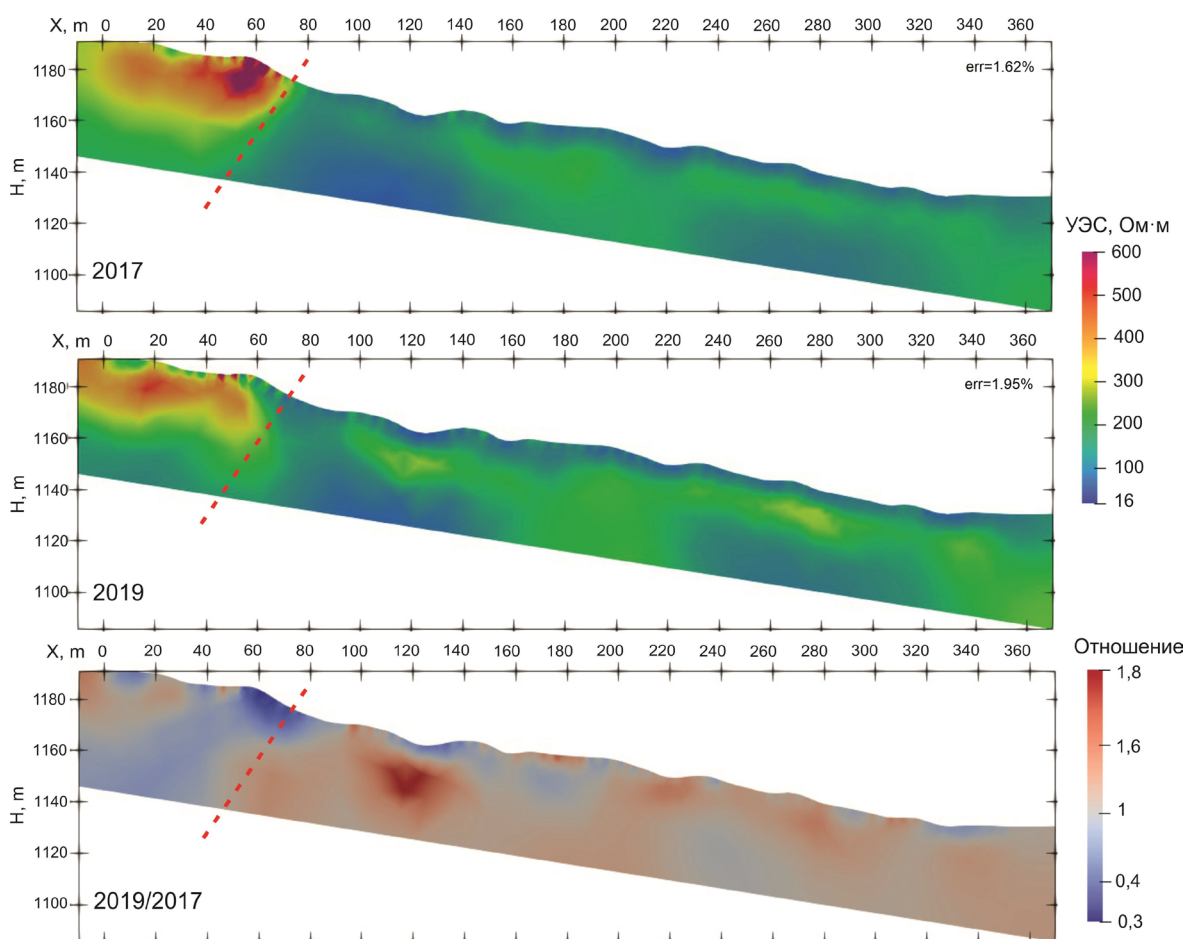


Рис. 2. Результаты интерпретации регулярных наблюдений электротомографии с помощью программы DiInSo в Уймонской впадине по профилю в районе пос. Баштала: разрезы по профилю в результате инверсии полевых данных за 2017, 2019 гг. Третий нижний разрез – отношение значений УЭС, полученных в 2019 г. к УЭС за 2017 г.

Fig. 2. Results of interpretation of regular electrotomography observations using the DiInSo program in the Uimon depression according to the profile in the area of the village. Bashtala: profile sections as a result of inversion of field data for 2017, 2019. The third lower section is the ratio of the UES values obtained in 2019 to the UES for 2017

Рассмотрим также результаты интерпретации по профилю Маргала (рис. 3). На двух верхних геоэлектрических разрезах, руководствуясь геологическими данными, можно выделить два крупных блока. В интервале профиля от 0 до ~170 м наблюдаются более низкоомные отложения с УЭС от 200 Ом·м и ниже. Далее от отметки 180 м до 360 м на разрезе прослеживается очень неоднородный блок осадочных пород в целом с повышенными значениями УЭС. Блок соответствует трещиноватым плотным глинам неогенового возраста, в массиве которых наблюдаются локальные разломные нарушения (одно из них обозначено красным штрихпунктиром). На разрезе отношений УЭС 2011 г. к 2017 г. можно выделить интервалы разреза, в пределах которых изменения УЭС значительны. К ним относится интервал 260–310 м, где чередуется зона максимального повышения УЭС с зоной его понижения – локальным разломом, реагирующим на тектонические движения в этой области.

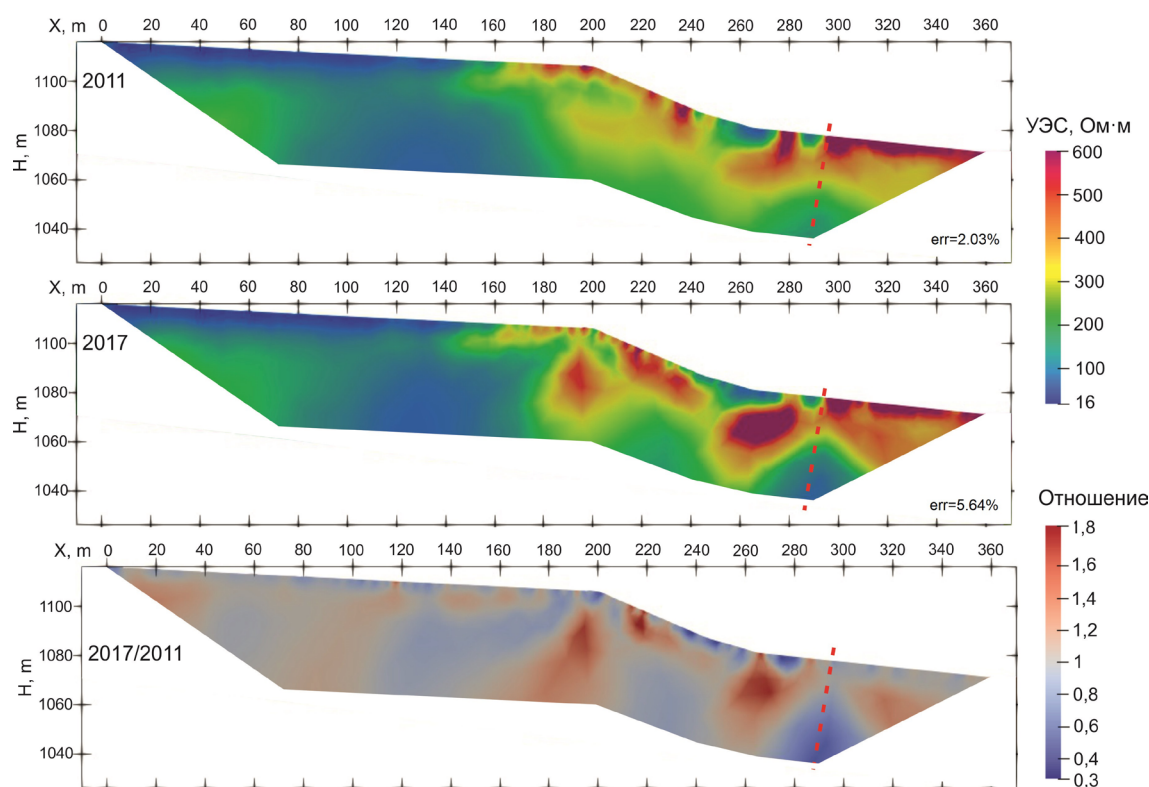


Рис. 3. Результаты интерпретации регулярных наблюдений методом электротомографии с помощью программы DiInSo в Уймонской впадине по профилю в районе пос. Маргала: два верхних разреза в результате инверсии данных ЭТ за 2011, 2017 гг.; третий нижний разрез – отношение значений УЭС, полученных в 2017 г. к УЭС за 2011 г.
Fig. 3. Results of interpretation of regular observations by electrotomography using the Diana program in the Uimon depression according to the profile in the area of the village. Margala: two upper sections as a result of the inversion of ET data for 2011, 2017; the third lower section is the ratio of the values of the UES obtained in 2017 to the UES for 2011

Заключение

Метод электротомографии для мониторинга применяется в России относительно недавно. Метод в целом эффективен для глубин от первых десятков до первой сотни метров. Использование его для задач мониторинга в сейсмоактивных районах обусловлено тем, что при усилении тектонических движений удельное электрическое сопротивление горных пород в разломных структурах изменяется как на больших глубинах, так и в приповерхностных отложениях.

В статье рассмотрено развитие программных средств DiInSo для задач интерпретации данных регулярных наблюдений методом электротомографии. Комплекс, предназначенный ранее для моделирования и инверсии, был дополнен графом обработки данных мониторинга. Выполненный анализ публикаций по этому направлению позволил выбрать и учесть факторы, влияющие на эффективность имеющихся подходов. В результате были определены оптимальные схемы регуляризации для задач мониторинга.

Комплекс был опробован при интерпретации полевых данных мониторинга на территории Горного Алтая. Первые опыты практического применения программы DiInSo показали, что даже простое отношение УЭС для двух измерений по профилю, полученных в разные временные интервалы, позволяет определить область разреза с присутствием его максимальных изменений. Именно слежение за такой областью перспективно для решения основной задачи прогнозирования опасных явлений. Вместе с тем уточняются геометрические характеристики зоны влияния разломной структуры, положение сместителя.

Планируется продолжение работы с программными средствами DiInSo для более полноценной количественной оценки вариаций УЭС. Опираясь на имеющийся опыт электромагнитного мониторинга, можно опробовать другие параметризации разреза, например, электропроводность, которая в случае низкоомных разрезов будет более эффективна по сравнению с удельным электрическим сопротивлением.

Кроме того, будет рассмотрена возможность введения функции чувствительности модели для наглядного и объективного выбора чувствительных областей модели к происходящим изменениям УЭС на основе количественных оценок.

Список литературы

1. **Добровольский И. П.** Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 217 с.
2. **Добровольский И. П.** О проблеме прогноза тектонического землетрясения // Геофизические исследования. 2010. Т. 11. № 1. С. 35–46.
3. **Могилевский К.** Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988.
4. **Рыбин А. К., Баталева Е. А., Александров П. Н., Непенин К. С.** Электромагнитные исследования современных геодинамических процессов литосферы областей внутриконтинентальной орографии на примере Тянь-Шаня // Физика Земли. 2022. Т. 68. № 5. С. 98–115.
5. **Сидорин А. Я.** Выдающееся достижение Российской академии наук: успешный прогноз землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 1. С. 5.
6. **Du X. B.** Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction. *Science China Earth Sciences*, January 2011, Volume 54, Issue 1, pp 145–156. DOI: doi: 10.1007/s11430-010-4031-y
7. **Du X. B., An Z., Yan R., Ye Q., Fan Y., et. al.** Changes in Apparent Resistivity in the Late Preparation Stages of Strong Earthquakes in Earthquake. *Research and Analysis in Statistical Studies, Observations and Planning*, Dr Sebastiano D'Amico (Ed.), 2012. pp. 199–220.
8. **Konstantaras A., Fouskitakis, G. N., Makris, J. P., and Vallianatos, F.** Stochastic analysis of geo-electric field singularities as seismically correlated candidates. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2008, 8, pp. 1451–1462, DOI: 10.5194/nhess-8-1451-200
9. **Zhao Y. L.** Geoelectric Precursors to Strong Earthquakes in China. *Tectonophysics*, 1994, Vol. 233, No. 1, 2, pp. 99–113.
10. **Ma Li, Ghen J., Chen Q.** Features of Precursor Field before and after Datong Yangao Earthquake Swarm. *J. Earth. Pred. Res.*, 1995, Vol. 4, No. 1, pp. 71–76.

11. **Du X.-B., Li N., Ye Q., Ma Z.-H., Yan R.** A Possible Reason for the Anisotropic Changes in Apparent Resistivity Near the Focal Region of Strong Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007. Vol. 50, № 6, pp. 1555–1565.
12. **Xie T., Lu J., Ren Y. and Zhao M.** Analysis on Apparent Resistivity variations of Garzê Station before the 2013 Lushan MS7 Earthquake. *Earthquake research in China*, 2014, (3), pp. 388–402.
13. **Wang K., Qi-Fu Chen, Shihong Sun, and Andong Wang.** Predicting the 1975 Haicheng Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96, pp. 757–795.
14. **Светов Б. С.** Электромагнитный мониторинг сейсмотектонических процессов // *Известия вузов. Геология и разведка*. 1982. № 2. С. 9–115.
15. **Соболев Г. А.** Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 313 с.
16. **Соболев Г. А., Пономарев А. В.** Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
17. **Соболев Г. А.** Методология, результаты и проблемы прогноза землетрясений // *Вестник РАН*. 2015. Т. 85. №3. С. 203–209.
18. **Брагин В. Д.** Активный электромагнитный мониторинг территории Бишкекского прогно-стического полигона: Дис. ...канд. физ.-мат. наук. М., 2001. 135 с
19. **Идармачев Ш. Г., Алиев М. М.** Вариации кажущегося сопротивления горных пород в пе-риод Кизилюртовского землетрясения 1999 г. в Дагестане // *Геофизические исследования*. 2013. Т. 14. №2. С. 15–25.
20. **Баталева Е. А., Мухамадеева В. А.** Комплексный электромагнитный мониторинг геоди-намических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018. № 2. С. 461–487. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0356>
21. **Rymarczyk T., Kłosowski G., Tchórzewski P., Cieplak T., Kozłowski E.** Area monitoring using the ERT method with multisensor electrodes. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019, 95 (1), pp. 153–156.
22. **Неведрова Н. Н., Шалагинов А. Е.** Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // *Геофизика*. 2015. № 1. С. 31–40.
23. **Nevedrova N. N., Sanchaa A. M., Shalaginov A. E., Babushkin S. M.** Electromagnetic monitoring in the region of seismic activation (on the Gorny Altai (Russia) example) // *Geodesy and Geodynamics*, 2019, 10 (6), pp. 460–470. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.06.001>
24. **Шапаренко И. О., Неведрова Н. Н.** Мониторинг разломных зон методом электротомо-графии (на примере Горного Алтая) // *Проблемы геодинамики и геоэкологии внутрикон-тинентальных орогенов: Материалы докладов VII Международного симпозиума*. 2018. С. 439–443.
25. **Ramachandran K., Tapp B., Rigsby T., Lewallen E.** Imaging of fault and fracture controls in the Arbuckle-Simpson aquifer, Southern Oklahoma, USA, through electrical resistivity sounding and tomography methods // *International Journal of Geophysics*, 2012, pp. 132–142
26. **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*. – IOP Publishing. 2021. V. 929, №. 1, pp. 012–025.
27. **Шапаренко И. О., Неведрова Н. Н., Мариненко А. В., Суродина И. В.** Анализ эффек-тивности программных комплексов электротомографии для интерпретации полевых дан-ных в сейсмоактивных районах (на примере Горного Алтая) // *Геология и минерально-сы-рьевые ресурсы Сибири*. 2023. № 2(54). С. 41–50.
28. **Schutze C., Friedel S. and Jacobs F.** Detection of three-dimensional transport processes in porous aquifers using geoelectrical quotient tomography. *European Journal of Environment and Engineering Geophysics*, 2022, №7, p. 3–19.

29. **Labrecque D. J. and Yang X.** Difference Inversion of ERT Data: a Fast Inversion Method for 3-D in Situ Monitoring. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2001, vol. 5, p. 83–90.
30. **Деев Е. В., Зольников И. Д., Турова И. В., Русанов Г. Г., Ряполова Ю. М., Неведрова Н. Н., Котлер С. А.** Палеоземлетрясения в Уймонской внутригорной впадине // *Геология и геофизика*, 2018. Т. 59, № 4. С. 437–452.
31. **Деев Е. В., Неведрова Н. Н., Русанов Г. Г., Санчаа А. М., Бабушкин С. М., Кречетов Д. В., Ельцов И. Н., Зольников И. Д.** Новые данные о строении Уймонской межгорной впадины (Горный Алтай) // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2012. №1 (9). С. 15–23.

References

1. **Dobrovolskii I. P.** Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya. M.: IFZ AN SSR, 1991. 217 p.
2. **Dobrovolskii I. P.** O probleme prognoza tektonicheskogo zemletryaseniya [On the problem of forecasting a tectonic earthquake]. *Geofizicheskie issledovaniya*, 2010, vol. 11, № 1, p. 35–46.
3. **Mogi K.** Predskazanie zemletryaseni. M.: Mir, 1988.
4. **Rybin A. K., Bataleva E. A., Aleksandrov P. N., Nepeina K. S.** Ehlektromagnitnye issledovaniya sovremennykh geodinamicheskikh protsessov litosfery oblastei vnutrikontinental'noi orogenii, na primere Tyan'-Shanya // *Fizika Zemli*, 2022, vol. 68, № 5, p. 98–115
5. **Sidorin A.YA.** Vydayushcheesya dostizhenie Rossiiskoi akademii nauk: uspesnyi prognoz zemletryaseniya v Yaponii 11 marta 2011 g. *Geofizicheskie protsessy i biosfera*, 2011, vol. 10, № 1, p. 5.
6. **Du X. B.** Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction. *Science China Earth Sciences*, January 2011, vol. 54, iss. 1, pp. 145–156. DOI: 10.1007/s11430-010-4031-y.
7. **Du X.B., An Z., Yan R., Ye Q., Fan Y., et. al.** Changes in Apparent Resistivity in the Late Preparation Stages of Strong Earthquakes in Earthquake. *Research and Analysis in Statistical Studies, Observations and Planning*, Dr Sebastiano D'Amico (Ed.), 2012, pp. 199–220.
8. **Konstantaras A., Fouskitakis, G. N., Makris, J. P., and Vallianatos, F.** Stochastic analysis of geo-electric field singularities as seismically correlated candidates. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2008, 8, pp. 1451–1462, DOI: 10.5194/nhess-8-1451-200
9. **Zhao Y. L.** Geoelectric Precursors to Strong Earthquakes in China. *Tectonophysics*, 1994, vol. 233, no. 1, 2, pp. 99–113.
10. **Ma Li, Ghen J., Chen Q.** Features of Precursor Field before and after Datong Yangao Earthquake Swarm. *J. Earth. Pred. Res.*, 1995, vol. 4, no. 1, pp. 71–76.
11. **Du X.-B., Li N., Ye Q., Ma Z.-H., Yan R.** A Possible Reason for the Anisotropic Changes in Apparent Resistivity Near the Focal Region of Strong Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, vol. 50, № 6, pp. 1555–1565.
12. **Xie T., Lu J., Ren Y. and Zhao M.** Analysis on Apparent Resistivity variations of Garzê Station before the 2013 Lushan MS7 Earthquake. *Earthquake research in China*, 2014, vol. 3, pp. 388–402.
13. **Wang K., Qi-Fu Chen, Shihong Sun, and Andong Wang.** Predicting the 1975 Haicheng Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, vol. 96, pp. 757–795.
14. **Svetov B. S.** Ehlektromagnitnyi monitoring seismotektonicheskikh protsessov [Electromagnetic monitoring of seismotectonic processes]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 1982, № 2, p. 9–115.
15. **Sobolev G. A.** Osnovy prognoza zemletryaseni [Earthquake Prediction Basics]. M.: Nauka, 1993, 313 p.

16. **Sobolev G. A.** Fizika zemletryaseni i predvestniki [Earthquake physics and precursors]. M.: Nauka, 2003, 270 p.
17. **Sobolev G. A.** Metodologiya, rezul'taty i problemy prognoza zemletryaseni [Methodology, results and problems of earthquake forecasting]. Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk, 2015, vol 85, № 3, pp. 203–209.
18. **Bragin V. D.** Aktivnyi ehlektromagnitnyi monitoring territorii Bishkekского prognosticheskogo poligona [Active electromagnetic monitoring of the territory of the Bishkek prognostic test site]: dis. kand. fiz.-mat. Nauk. M., 2001. 135 p.
19. **Idarmachev SH. G., Aliev M. M.** Variatsii kazhushchegosya soprotivleniya gornykh porod v period Kizilyurtovskogo zemletryaseniya 1999 g. v Dagestane [Variations in apparent resistivity of rocks during the 1999 Kizilyurt earthquake in Dagestan] // Geofizicheskie issledovaniya, 2013, vol. 14, № 2, pp. 15–25.
20. **Bataleva E. A., Mukhamadeeva V. A.** Kompleksnyi ehlektromagnitnyi monitoring geodinamicheskikh protsessov Severnogo Tyan'-Shanya (Bishkekский geodinamicheskii poligon) [Integrated electromagnetic monitoring of geodynamic processes in the Northern Tien Shan (Bishkek geodynamic test site)] // Geodynamics & Tectonophysics, 2018, № 2, p. 461–487. DOI: 10.5800/GT-2018-9-2-0356
21. **Rymarczyk T., Kłosowski G., Tchórzewski P., Cieplak T., Kozłowski E.** Area monitoring using the ERT method with multisensor electrodes. Przegląd Elektrotechniczny, 2019, vol. 95 (1), pp. 153–156.
22. **Nevedrova N. N., Shalaginov A. E.** Monitoring ehlektromagnitnykh parametrov v zone seismicheskoi aktivizatsii Gornogo Altaya [Monitoring of electromagnetic parameters in the zone of seismic activity in Gorny Altai]. Geofizika, 2015, № 1, p. 31–40.
23. **Nevedrova N. N., Sanchaa A. M., Shalaginov A. E., Babushkin S. M.** Electromagnetic monitoring in the region of seismic activation (on the Gorny Altai (Russia) example) // Geodesy and Geodynamics, 2019, vol. 10 (6), pp. 460–470. <https://DOI.org/10.1016/j.geog.2019.06.001>
24. **Shaparenko I. O., Nevedrova N. N.** Monitoring razlomnykh zon metodom ehlektrotomografii (na primere Gornogo Altaya) [Monitoring of fault zones by electrotomography (on the example of Gorny Altai)]. Problemy geodinamiki i geoekologii vnutrikontinental'nykh orogenov: Materialy dokladov VII Mezhdunarodnogo simpoziuma, 2018, p. 439–443.
25. **Ramachandran K., Tapp B., Rigsby T., Lewallen E.** Imaging of fault and fracture controls in the Arbuckle-Simpson aquifer, Southern Oklahoma, USA, through electrical resistivity sounding and tomography methods // International Journal of Geophysics, 2012, pp. 132–142
26. **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. IOP Publishing, 2021, vol. 929, № 1, pp. 012–025.
27. **Shaparenko I. O., Nevedrova N. N., Marinenko A. V., Surodina I. V.** Analiz ehffektivnosti programmnykh kompleksov ehlektrotomografii dlya interpretatsii polevykh dannykh v seismoaktivnykh raionakh (na primere Gornogo Altaya) [Анализ эффективности программных комплексов электротомографии для интерпретации полевых данных в сейсмоактивных районах (на примере Горного Алтая)], Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri, 2023, № 2(54), p. 41–50.
28. **Schutze C., Friedel S. and Jacobs F.** Detection of three-dimensional transport processes in porous aquifers using geoelectrical quotient tomography. European Journal of Environment and Engineering Geophysics, 2022, №7, p. 3–19.
29. **Labrecque D. J. and Yang X.** Difference Inversion of ERT Data: a Fast Inversion Method for 3-D in Situ Monitoring. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2001, vol. 5, pp. 83–90.

30. **Deev E. V., Zol'nikov I. D., Turova I. V., Rusanov G. G., Ryapolova Yu. M., Nevedrova N. N., Kotler S. A.** Paleozemletryaseniya v Uimonskoi vnutrigornoj vpadine// *Geologiya i geofizika*, 2018, vol. 59, № 4, pp. 437–452.
31. **Deev E. V., Nevedrova N. N., Rusanov G. G., Sanchaa A. M., Babushkin S. M., Krechetov D. V., El'tsov I. N., Zol'nikov I. D.** New data on structure of Uimon intermountain basin (Gorny Altai). *Geology and mineral resources of Siberia*, 2011, №1 (9), pp. 15–23.

Информация об авторах

Неведрова Нина Николаевна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
ResearcherID O-2143-2015

Шалагинов Александр Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
ResearcherID O-2200-2017

Мариненко Аркадий Вадимович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
ResearcherID AAU-7664-2020

Шапаренко Илья Олегович, младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
ResearcherID I-9677-2018

Information about the Authors

Nina N. Nevedrova, Doctor in Geology and Mineralogy, Chief Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
ResearcherID O-2143-2015

Aleksandr E. Shalaginov, PhD, Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
ResearcherID O-2200-2017

Arkadii V. Marinenko, PhD, Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
ResearcherID AAU-7664-2020

Ilya O. Shaparenko, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
ResearcherID I-9677-2018

Статья поступила в редакцию 24.07.2023;

одобрена после рецензирования 29.08.2023; принята к публикации 29.08.2023

The article was submitted 24.07.2023;

approved after reviewing 29.08.2023; accepted for publication 29.08.2023