

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА АНАЛИЗА ДАННЫХ АЗИМУТАЛЬНОГО МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА БИШКЕКСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

К. С. Непейна*, Е. А. Баталева

Научная станция РАН в г. Бишкеке,

г. Бишкек, Кыргызстан

*nepeina.k@mail.ru

Аннотация

В работе представлена методика обработки данных магнитотеллурического (МТ) мониторинга, принятая с 2010 г. в Научной станции РАН в г. Бишкеке (НС РАН). Отличие предлагаемой методики от стандартной заключается в оценке импедансных соотношений после амплитудно-фазовой коррекции внутри часовых файлов магнитотеллурического зондирования, полученных из непрерывной необработанной записи. Современные дополнения, надстройки и создание дополнительных программ позволили адаптировать и автоматизировать получение частотно-временных рядов (ЧВР) МТ данных в виде относительных вариаций различных расчетных электромагнитных параметров как цветных псевдоразрезов, а также добавление комплементарной входной информации для дополнительного анализа происходящих геодинамических событий. Эти усовершенствования взяты в практику оптимизации обработки данных МТ мониторинга стационарных и режимных станций сети НС РАН. Зарегистрированы права на программу MTDataVar. Показаны примеры результатов адаптации предлагаемой методики. Использование запатентованных ООО «Северо-Запад» программных комплексов МТ-Corrector и ЕРІ-KIT позволило автоматизировать получение импедансных и фазовых соотношений для пост-обработки ЧВР. Интеграция данных о приливных воздействиях, эндогенном электромагнитном поле и сейсмической активности обеспечивает сопоставление динамики геофизических параметров и напряженно-деформированного состояния среды. На примере землетрясений и контролируемых взрывов показана высокая чувствительность метода к изменениям в литосфере и анизотропии проводимости. Разработанный инструментарий способствует выявлению тензочувствительных зон, регистрации пространственно-временных аномалий и прогнозированию активизации разломных структур. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода для комплексного мониторинга геодинамических процессов в тектонически активных регионах. Предложены направления дальнейшего развития средств обработки и анализа МТ данных.

Ключевые слова: естественное электромагнитное поле, магнитотеллурический мониторинг, азимутальная анизотропия, вариации кажущегося электрического сопротивления, напряженно-деформированное состояние среды, электропроводность литосферы, импедансные соотношения, амплитудно-фазовая коррекция, частотно-временные ряды, псевдоразрезы, тензочувствительные зоны, лунно-солнечные приливы, электромагнитное поле эндогенного происхождения

Финансирование: Исследование выполнено по теме государственного задания НС РАН (номер Минобрнауки РФ 1021052806445-4-1.5.1)

Благодарности: Авторы благодарят ученого секретаря НС РАН О.Б. Забиякову за предоставленные материалы и рецензентов за комментарии

Для цитирования: Непейна К.С., Баталева Е.А. Современные средства анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга на Бишкекском геодинамическом полигоне. *Вестник СВФУ*. 2025;(4): 44-56. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-44-56

MODERN TOOLS OF ANALYZING AZIMUTHAL MAGNETOTELLURIC MONITORING DATA AT THE BISHKEK GEODYNAMIC POLYGON TEST SITE

*Kseniia S. Nepeina**, *Elena A. Bataleva*

Research Station RAS in Bishkek,

Bishkek, Kyrgyzstan

*nepeina.k@mail.ru

Abstract

The paper presents a methodology for processing magnetotelluric (MT) monitoring data adopted since 2010 at the Bishkek Research Station of the Russian Academy of Sciences (RS RAS). The proposed methodology differs from the standard one as it evaluates impedance relationships after amplitude-phase correction within hourly files of MT sounding obtained from a continuous raw record from stationary and regime stations of the RS RAS network. Modern additions, add-ons, and the creation of additional programs made it possible to adapt and automate the receipt of time-frequency series (TFS) in the form of relative variations of various calculated electromagnetic parameters as color pseudo-sections, as well as adding complementary input information for additional analysis of ongoing geodynamic events. The usage of the patented MT-Corrector and EPI-KIT software packages, developed by Nord-West Ltd., made it possible to automate the acquisition of impedance and phase ratios for TFS post-processing. Integration of data on tidal effects, electromagnetic field characteristics of endogenous origin, and seismic activity ensures correlation between the dynamics of geophysical parameters and the stress–strain state of the medium. The developed toolkit facilitates the identification of stress-sensitive zones, registration of spatiotemporal anomalies, and forecasting of fault activation processes. The obtained results confirm the efficiency of the proposed approach for comprehensive monitoring of geodynamic processes by MT data in tectonically active regions.

Keywords: natural electromagnetic field, magnetotelluric monitoring, azimuthal anisotropy, apparent resistivity variations, stress and strain state of the medium, lithospheric conductivity, impedance relationships, amplitude–phase correction time–frequency series, pseudo-sections, stress-sensitive zones, lunar-solar tides, electromagnetic field of endogenous origin

Funding: The research is conducted under the Federal State assignment for RS RAS number of 1021052806445-4-1.5.1

Acknowledgements: Authors acknowledge Academic Secretary O.B. Zabinyakova for the provided materials and reviewers for their comments

For citation: Nepeina K.S., Bataleva E.A. Modern tools of analyzing azimuthal magnetotelluric monitoring data at the Bishkek Geodynamic Polygon Test Site. *Vestnik of North-Eastern Federal University. "Earth Sciences"*. 2025;(4): 44-56. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-44-56

Введение

В работе [1] были рассмотрены две группы явлений, протекающих в геологической среде, которые формирующих динамические вариации свойств геоэлектрического разреза при изменении напряженно-деформированного состояния геосреды. Такой тип явлений обусловлен переменным состоянием естественного электромагнитного поля Земли. Во многом, это связано с анизотропией геологической среды. В нашем случае представляет интерес электрическая анизотропия горных пород – различие сопротивлений в зависимости от направления прохождения тока [2]. Успешные реализации мониторинга взаимосвязи характера изменения электромагнитных параметров и геодинамической активности получены: в горных регионах – для Алтая [3, 4], для Тянь-Шаня [5-12], для Карелии [13] и др. Такие исследования геодинамического состояния среды с помощью электромагнитных методов перспективны и на рудниках.

Использование данных профильных магнитотеллурических (МТ) зондирований по стандартной методике с помощью станций Phoenix MTU-5 (Canada) позволило изучить глубинное строение Центрального и Северного Тянь-Шаня и построить детальные геоэлектрические модели вдоль серии профилей, секущих основные тектонические структуры [14]. На основе полученного распределения геоэлектрических неоднородностей на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП) были выбраны тензочувствительные зоны и установлены стационарные (Аксу и Чон-Курчак) и режимные (Кентор С5, Укок-2 и др.) пункты МТ мониторинга ИС РАН (рис. 1).

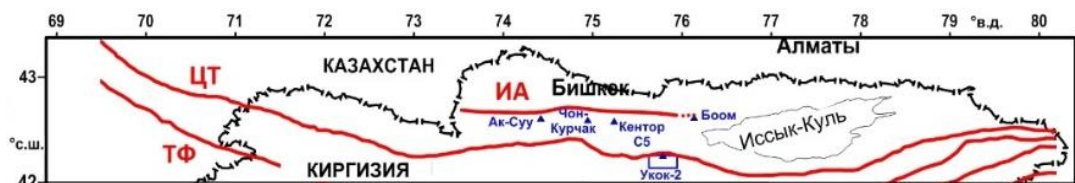


Рис. 1. Стационарные (Аксу и Чон-Курчак) и режимные (Кентор С5, Укок-2 и др.) пункты МТ мониторинга ИС РАН на Северном Тянь-Шане (треугольники). Красными линиями показаны крупные разломы: ТФ – Таласо-Ферганский, ЦТ – Центрально-Терсейский, ИА – Иссyk-Атинский [15]

Fig. 1. Stationary (Aksu and Chon-Kurchak) and regime (Kentor C5, Ukok-2) MT monitoring points in the Northern Tien Shan (triangles). Red lines show main faults: TF – Talas-Fergana, CT – Central Terskey, IA – Issyk-Ata [15]

Чувствительность электромагнитного поля к таким событиям, как землетрясения и взрывы, дает основания рассматривать его вариации как индикатор современных геодинамических процессов. Так, например, на всех 5 компонентах электромагнитного поля (E_x , E_y , H_x , H_y , H_z) на записях стационара Аксу было чётко зарегистрировано мощное ($M \sim 7$) Учтурфанское землетрясение 22.01.2024 (на удалении ~ 400 км) (рис. 2). Это доказывает существование электромагнитного отклика от землетрясений в условиях тензочувствительного пункта Аксу, что и отражается в вариациях наблюдаемых компонент. Характеристики данного события согласуются с результатами, полученными ранее при проведении геофизических исследований для изучения Камбаратинского взрыва [16].

Начало использования методики азимутального магнитотеллурического мониторинга было положено в 2010 г., при изучении контролируемого геодинамического события. На проектируемой Камбаратинской ГЭС был проведён промышленный взрыв мощностью 2,914 кт [17]. В его рамках реализован комплекс геофизических исследований, включавший сейсмологические, электромагнитные и GPS-наблюдения [16]. Электромагнитные измерения были направлены на выявление связи вариаций кажущегося сопротивления с изменением напряжённо-деформированного состояния земной коры Тянь-Шаня [16-24]. Анализ данных показал, что направления максимальных и минимальных изменений электросопротивления совпадают с предполагаемыми осями сжатия и растяжения деформационного поля и сопровождается перераспределением флюидов в порово-трещинной системе [16-18].

Изучению эффектов, возникающих при азимутальной анизотропии электропроводности, уделяют много внимания, приближаясь к решению прямых и обратных задач с разных сторон и рассматривая множество аспектов [25-31].

При этом стоит отметить, что стандартная методика обработки присутствует только на начальном этапе обработки без применения дальнейшей инверсии данных. Отличие заключается в дальнейшем разбиении непрерывной записи МТ наблюдений на почасовые отрезки в соответствии с предложенным ранее алгоритмом [18, 19]. Процесс выделения часовых интервалов в диапазоне периодов от 0.01 до 100 с реализуется в программе фирмы Phoenix SSMT2000 [32].

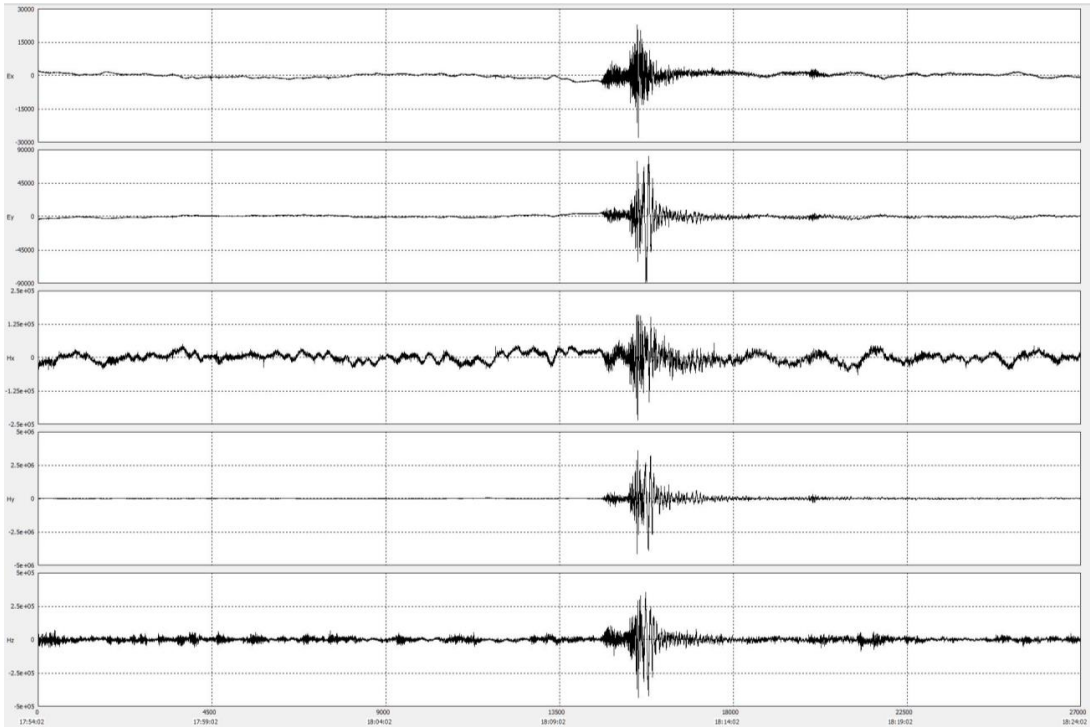


Рис. 2. Исходная запись Учтурфанского землетрясения 22.01.2024 по данным Phoenix MTU-5 на стационаре Аксу в окне программы EPI-KIT

Fig. 2. Raw recording of the Uqturpan earthquake on 22.01.2024 by Phoenix MTU-5 at the Aksu station in the EPI-KIT program window

Для просмотра и коррекции кривых зондирования используются такие программные продукты как SSMT2000, MT-Corrector и EPI-KIT [33] с получением *.edi-файлов [34]. Последующая обработка проводилась в отдельной созданной для этих целей программ GraphBuilder, на выходе которой получают *.xls-файл с указанием диапазона периодов зондирования, среднего значения и относительных вариаций электромагнитных параметров в различных азимутах для каждой часовой «сессии» [35].

Важным направлением развития и совершенствования методов анализа МТ-данных является автоматизация и оптимизация процесса построения итоговых псевдоразрезов вариаций различных вычисленных электромагнитных параметров. Дополнительно, интеграция вспомогательной информации, такой как динамика лунно-солнечных приливов, энергетические характеристики эндогенной составляющей электромагнитного поля и параметры сейсмической активности на территории БГП, позволяет проводить более точные сопоставления и интерпретации.

Материалы и методы исследования

Методика азимутального разворота основывается на классических уравнениях, полученных в [36]:

$$Z_{xx}^{\alpha}(T) = Z_{xx} \cos^2 \alpha + Z_{yy} \sin^2 \alpha + (Z_{xy} + Z_{yx}) \sin \alpha \cos \alpha, \tag{1}$$

$$Z_{yy}^{\alpha}(T) = Z_{yy} \cos^2 \alpha - Z_{yx} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha, \tag{2}$$

$$Z_{yx}^{\alpha}(T) = Z_{yx} \cos^2 \alpha - Z_{xy} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha, \tag{3}$$

$$Z_{xy}^{\alpha}(T) = Z_{xy} \cos^2 \alpha + Z_{xx} \sin^2 \alpha - (Z_{xy} + Z_{yx}) \sin \alpha \cos \alpha, \tag{4}$$

где $\mathbf{Z}=\mathbf{E}/\mathbf{H}$ – тензор магнитотеллурического импеданса; x, y, z – пространственные направления, α – азимут поворота системы, T – период зондирования, $0.01 \leq T \leq 100$ с.

При этом кажущееся сопротивление на каждом азимуте в зависимости от периода пересчитывается для каждой часовой реализации с шагом 15° по азимуту [18, 19]:

$$\rho_m^\alpha(T) = \frac{T |Z_m^\alpha(T)|^2}{2\pi\mu_0}, m = xx, xy, yx, yy, \quad (5)$$

где m – индекс импеданса в соответствующем направлении.

Численно эти параметры были получены в специально созданной вспомогательной программе GraphBuilder, где рассчитываются среднее значение параметра и его относительные вариации. Затем для визуального отображения этих относительных вариаций электромагнитных параметров, выстраиваются вручную оператором в программе Surfer (Golden Software, USA) при помощи выбора соответствующего диапазона в виде псевдоразрезов (цветных панелей), называемых частотно-временными рядами (ЧВР) [35]. Результат представляет собой цветной псевдоразрез относительных вариаций значений электромагнитных параметров. По вертикальной оси отложен логарифм периода зондирования идентичный понятию псевдоглубина, по горизонтальной оси – время наблюдений с дискретностью 1 час. Данный формат визуализации обеспечивает анализ напряжённо-деформированного состояния среды одновременно по четырём параметрам: азимуту, периоду зондирования (глубине), амплитуде вариаций электропроводности и времени.

На данный момент построение ЧВР автоматизировано в программе MTDataVar [37], разработанной в 2023 г. в ходе выполнения проекта РФФ № 22-27-00567 «Изучение внутреннего строения и динамики активных геологических разломов с использованием комплекса электромагнитных зондирований (на примере Северного Тянь-Шаня)». Результаты её работы были продемонстрированы на данных аудио-МТЗ (рис. 3). Здесь на вертикальной оси отложены периоды МТ зондирования (T), связанные напрямую с глубиной. Программа значительно упрощает ручной обработку файла Excel и ускоряет построение псевдоразрезов.

Развитие методики сопоставления результатов азимутального МТ-мониторинга связано с комплексным учётом энергетических характеристик электромагнитного поля эндогенного происхождения, вертикальной компоненты расчётных лунно-солнечных приливов и параметров сейсмических событий [35; 38]. Предполагается, что источники электромагнитного поля создаются как внутренними (эндогенными), так и внешними (экзогенными) источниками, можно разделить регистрируемое электромагнитное поле на две составляющие. Тогда вводится понятие вектора электромагнитного поля эндогенного происхождения ($\mathbf{Y}=\mathbf{E}_0-\mathbf{Z} \cdot \mathbf{H}_0$), где \mathbf{Z} – импеданс нижнего полупространства; \mathbf{E}_0 – вектор измеренного электрического поля, \mathbf{H}_0 – вектор

измеренного магнитного поля [38, 39]. Тогда математически интеграл $\int_0^{\Delta\omega} |Y(\omega)|d\omega$

показывает во временной области поведение энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения для широкого диапазона частот, что свидетельствует об активизации или затухании области всех источников на глубине [40].

На данный момент при автоматизированной обработке сейсмологических каталогов (сети KNET ©НС РАН и KRNET © ИС НАН КР) (Excel-формат), графики были дополнены параметрами: расчётным временем относительно начала записи ($T_s = T_0 - T_{MT}$), глубиной (D) и энергетическим классом (K), азимутальным углом между пунктом мониторинга и эпицентром (Az), расстоянием от очага до станции (R) и [35].

Благодаря опции Surfer ‘classed post map’ гипоцентры землетрясений отображаются в виде специальных символов, например, звезд, где размер символа пропорционален энергетическому

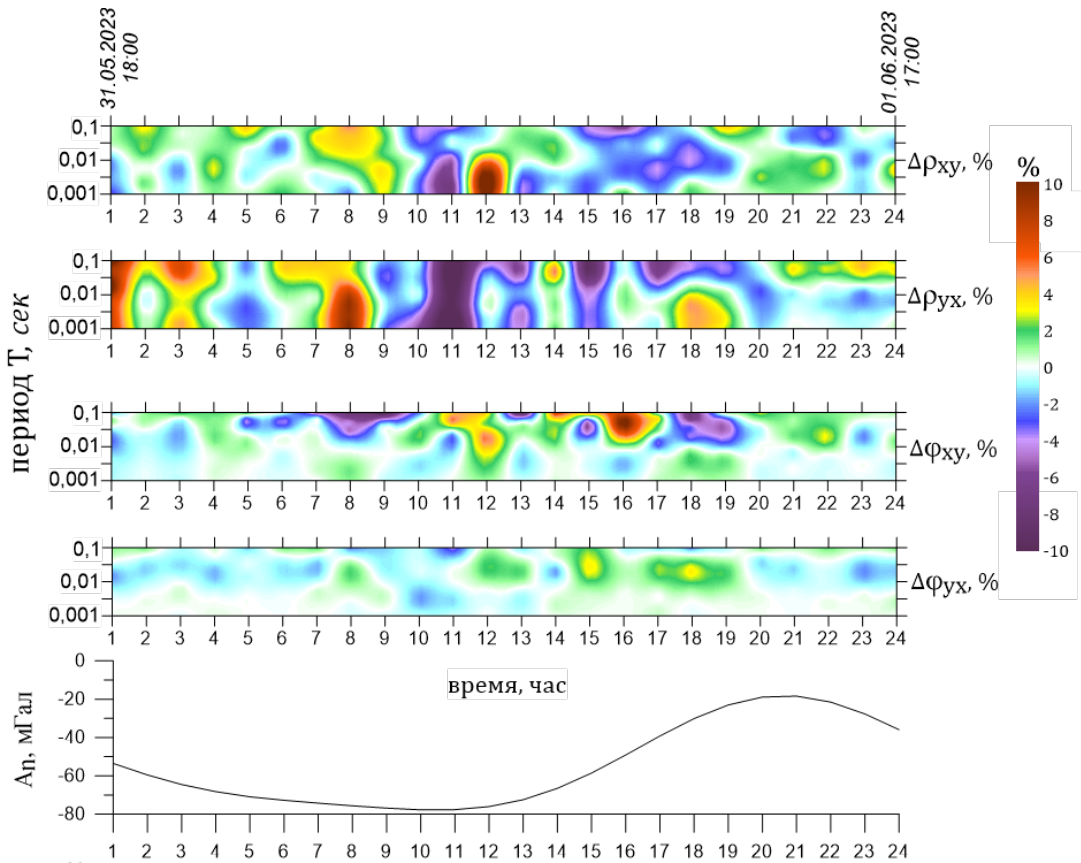


Рис. 3. Результат работы программы MTDataVar для визуализации ЧВР в мониторинговом пункте АМТЗ «Орто-Сай N2» для сопоставления относительных вариаций магнитотеллурических параметров с компонентами приливообразующего ускорения для пункта [37]

Fig. 3. The result of the MTDataVar program for visualizing the TFS at the monitoring point of the AMTS “Orto-Say N2” to compare the relative variations of magnetotelluric parameters with the components of the tidal acceleration for the point [37]

классу события, где строится зависимость между расстоянием между очагом землетрясения и координатой МТ пункта (R) и направлением на него (Az). Подробности приведены в работе [35]. На рис. 4 представлен пример получаемых графиков.

Результаты исследования

Полученные частотно-временные ряды относительных вариаций электромагнитных параметров (например, кажущегося сопротивления) отражают напряженно-деформированное состояние среды. ЧВР удобно из рассматривать для анализа и интерпретации в виде цветных псевдоразрезов выбранного параметра. Ранее не раз было показано, что:

- 1) установлена корреляция между вариациями кажущегося электросопротивления, лунно-солнечными приливыми воздействиями и сейсмической активностью.
- 2) сейсмические события приурочены к экстремумам приливных колебаний: рост амплитуды вертикальной компоненты соответствует увеличению ρ_k , её минимум – снижению ρ_k .
- 3) наиболее выраженные вариации ρ_k , связанные с инициированными взрывом сейсмическими событиями, наблюдаются в верхней части разреза на глубинах до 10–15 км.
- 4) выявлена устойчивая связь между анизотропией электрического сопротивления и эндогенной характеристикой электромагнитного поля;

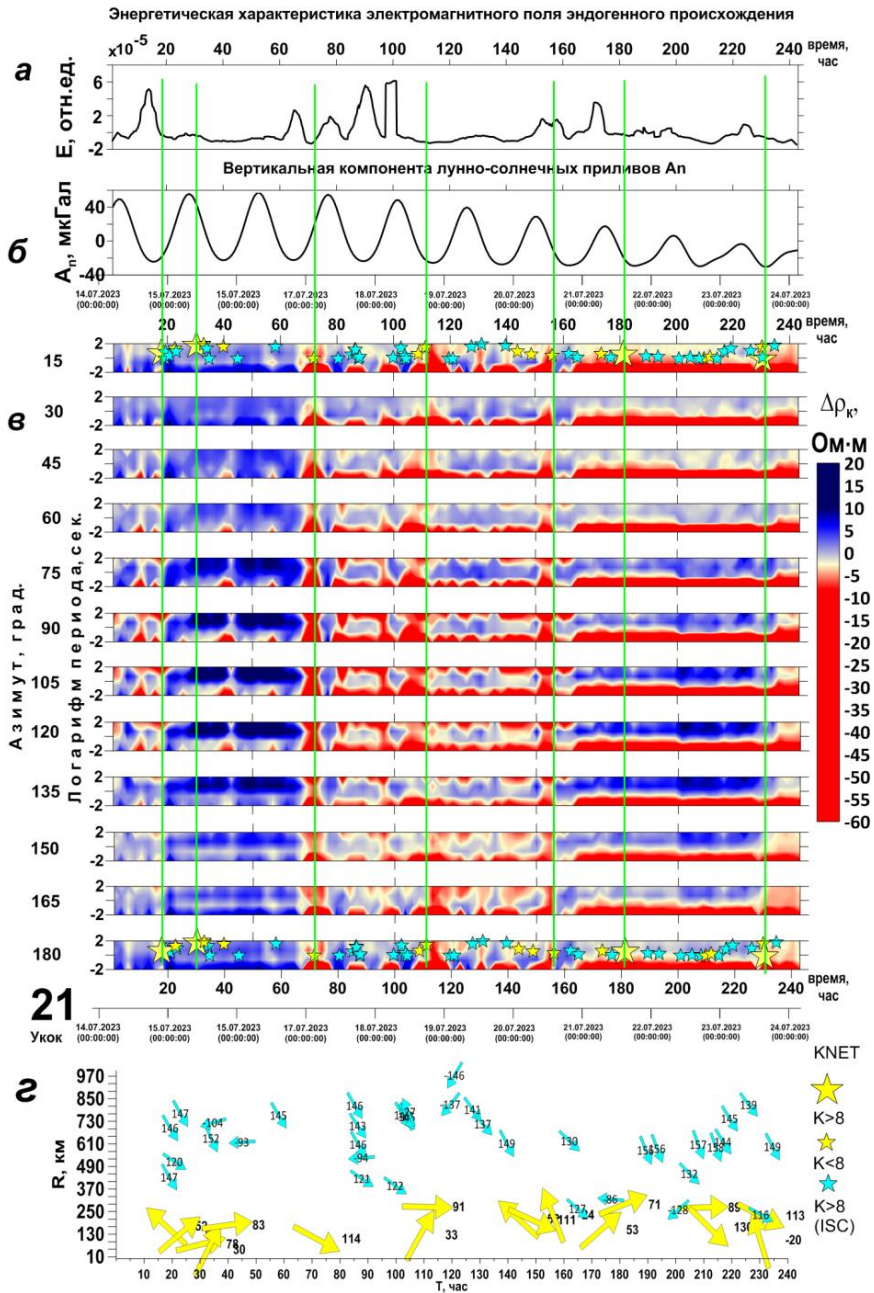


Рис. 4. Результат автоматизированного построения азимутальных псевдоразрезов (в) в зависимости от МТ-мониторинга пункта Укок-2 за период 14.07.2023–24.07.2023 в сравнении с (а) энергетической характеристикой эндогенного электромагнитного поля, (б) вертикальной компонентой лунно-солнечных приливов (A_n) и (г) относительным пространственным положением эпицентров землетрясений. В качестве источников данных использованы сейсмологические каталоги: Кыргызстана (KNET) и международного сейсмологического центра (ISC)

Fig. 4. The result of automated construction of azimuthal pseudo-sections (c) by the relationship of MT monitoring point Ukok-2 for the period 14.07.2023–24.07.2023 in comparison with (a) the energy characteristic of the endogenous electromagnetic field, (b) the vertical component of lunisolar tides (A_n) and (d) the relative spatial position of earthquake epicenters. The seismological catalogs of Kyrgyzstan (KNET) and International seismological centre (ISC) were used as data sources

5) некоторые азимуты по отношению к мониторинговым пунктам БГП часто являются наиболее чувствительными, что было доказано на пример пункта Аксу для угла 57° [Баталева и др., 2014]);

6) чувствительность компонент электромагнитного поля к сейсмическим событиям и взрывам дает основания рассматривать его вариации как индикатор современных геодинамических процессов.

Заключение

Данная работа направлена на оптимизацию обработки и интерпретации данных магнитотеллурического мониторинга, выполняемого в сейсмоактивном регионе. На данный момент ведутся дополнительные тестирования возможностей расширения функционала и удобства перечисленных средств анализа. В дальнейшем планируется проанализировать взаимосвязь частоты смены знака вариаций и азимута между событиями, наличие кластеров (сейсмогенерирующей зоны), так и самих амплитуд вариаций. Выполнить оптимизацию обработки данных на основе модифицированного обучения нейронной сети.

На данный момент стоит первостепенная задача систематизации накопленного материала магнитотеллурического мониторинга, также совершенствования процесса интерпретации и отслеживания смены картины на псевдоразрезах. Вероятно, для этих целей следует применить «цифровое зрение» или нейросетевые алгоритмы.

Литература

1. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Непейна К.С., Забинякова О.Б. Особенности применения методов магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования в горах Тянь-Шаня. *Наука и технологические разработки*. 2023;102(2-3):4-39. DOI: 10.21455/std2023.2-3-1.
2. Cardoso L.H., Bacellar L.D.A.P. Assessment of geoelectrical configurations using reduced physical models for the structural mapping of rock mass and fractured aquifers. *Journal of Applied Geophysics*. 2021;191:104368. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104368.
3. Неведрова Н.Н., Пономарев П.В. Результаты многолетнего мониторинга электрофизических параметров в сейсмоактивной зоне горного Алтая методами постоянного тока. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018;3:281-287. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-3-281-287.
4. Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая. *Геофизика*. 2015;1:31-40.
5. Трапезников Ю.А., Андреева Е.В., Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Вольхин А.М., Голубцова Н.С., Рыбин А.К. Магнитотеллурические зондирования в горах Киргизского Тянь-Шаня. *Физика Земли*. 1997;1:3-20.
6. Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Голланд М.Л., Голубцова Н.С., Кузнецов В.А. Интерпретация глубинных магнитотеллурических зондирований в Чуйской межгорной впадине. *Физика Земли*. 1989;9:42-45.
7. Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Рыбин А.К. Изучение необратимых деформаций в литосфере Тянь-Шаня по магнитотеллурическим данным (методологический аспект). *Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле*. 2019;2(42):42-56. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56.
8. Баталев В.Ю., Вольхин А.М., Рыбин А.К., Трапезников Ю.А., Финякин В.В. Глава 8. Строение земной коры восточной части Киргизского Тянь-Шаня по данным МТЗ и ГМТЗ. *Проявление геодинамических процессов в геофизических полях* / Отв. ред. Е.П. Велихов, В.А. Зейгарник. М: Наука, 1993:96-113.
9. Баталева Е.А., Мухамадеева В.А. Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон). *Геодинамика и тектонофизика*. 2018; 9(2):461-487. DOI: 10.5800/GT-2018-9-2-0356.
10. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Ильичев П.В., Щелочков Г.Г. Магнитотеллурические и магнитовариационные исследования Киргизского Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*. 2001; 42(10):1566-1173.
11. Рыбин А.К., Спичак В.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Площадные магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*. 2008;5:445-460.

12. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Матюков В.Е. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня. *Вестник КPCУ*. 2011;11(4):29-40.
13. Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевцов А.Н. Влияние лунно-суточных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры. *Докл. РАН*. 2000; 371(2):235–239.
14. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Непеина К.С., Матюков В.Е. Объемно-пространственная сегментация литосферы Тянь-Шаня по данным геофизических исследований. *Геодинамика и тектонофизика*. 2021;12(3):508-543. DOI: 10.5800/GT-2021-12-3-0537.
15. Баталева Е.А. Результаты мониторинга зон динамического влияния разломных структур Северного Тянь-Шаня. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2022;2(2):332-339.
16. Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов. *Физика Земли*. 2013;3:105-113. DOI: 10.7868/S0002333713030034.
17. Брагин В.Д. Электромагнитные исследования эффектов, обусловленных мощным промышленным взрывом в районе Нарынского каскада гидроэлектростанций (Камбарата). *Вестник КPCУ*. 2011;11(4):46-53.
18. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга. Часть 1. Анализ данных магнитотеллурического мониторинга. *Вестник КPCУ*. 2014;14(7):3-7.
19. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга. Часть 2. Разработка программного обеспечения для анализа данных МТ-мониторинг. *Вестник КPCУ*. 2014;14(7):8-12.
20. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Детальный ретроспективный анализ данных магнитотеллурического мониторинга (Бишкекский геодинамический полигон). *Вестник КPCУ*. 2017;17(12):141-144.
21. Bataleva E.A. Processing, analysis and interpretation of time-frequency series for magnetotelluric monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2019th International Symposium on Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects*. 2019;350:012053. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012053.
22. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Анализ результатов Камбаратинского эксперимента с привлечением методики синхронных измерений. *Вестник КPCУ*. 2017;17(1):181-184.
23. Rybin A., Bataleva E., Nepeina K., Matiukov V., Alexandrov P., Kaznacheev P. Response of cracking processes in variations of geophysical fields. *Journal of Applied Geophysics*. 2020;181:104144. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104144.
24. Nepeina K., Bataleva E., Alexandrov P. Electromagnetic Monitoring of Modern Geodynamic Processes: An Approach for Micro-Inhomogeneous Rock through Effective Parameters. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023;13(14):8063. DOI: 10.3390/app13148063.
25. Ялов Т.В. Электрическая анизотропия горизонтально-неоднородных сред. Диссертация ... к. т. н. ФГБОУ ВПО МГУ имени М.В. Ломоносова. 2014:106 с.
26. Шалагинов А.Е., Неvedрова Н.Н., Санчаа А.М., Шапаренко И.О., Пономарев П.В. Электрическая анизотропия по данным методов постоянного тока в районе Быстровского полигона (берег водохранилища в Новосибирской области). *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019;2(2):158-164.
27. Сухорукова К.В., Петров А.М. Электрическая анизотропия терригенных отложений: краткий обзор подходов к ее определению по данным электрокаротажа в вертикальных скважинах. *Геофизические технологии*. 2021;3:41-66. DOI: 10.18303/2619-1563-2021-3-41.
28. Luo T., Hu X., Chen L., Xu, G. Investigating the Magnetotelluric Responses in Electrical Anisotropic Media. *Remote Sens*. 2022;14:2328. DOI: 10.3390/rs14102328.
29. Busby J., Jackson P. The application of time-lapse azimuthal apparent resistivity measurements for the prediction of coastal cliff failure. *Journal of Applied Geophysics*. 2006;59(4):261-272. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2005.10.004.
30. Salam R., Parnadi W.W. Laboratory-scaled Azimuthal Resistivity Survey for Fracture Detection. *IOP Conf. Ser: Earth Environ. Sci*. 2021;873:012079. DOI: 10.1088/1755-1315/873/1/012079.
31. Gasimov E., Pekşen E., Durdağ D., Salamov A., Najafov O. Modeling and interpretation of electrical resistivity data in anisotropic media using a generalized regression neural network: A case study on the Lokbatan mud volcano, Azerbaijan. *Journal of Applied Geophysics*. 2024;224:105365. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2024.105365.

32. Непеина К.С., Валуийский А.Ю. Технологический подход разделения непрерывных данных магнитотеллурического зондирования для сейсмо-электромагнитных исследований. *Современные техника и технологии в научных исследованиях. Бишкек: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке*, 2021:159-167.
33. Сайт ООО «Северо-Запад» [<https://nw-geo.ru/>] (Дата обращения 21.11.2024).
34. Zorin N., Aleksanova E., Shimizu H., Yakovlev D. Validity of the dispersion relations in magnetotellurics: Part I-theory. *Earth, Planets and Space*. 2020;72(1):9. DOI: 10.1186/s40623-020-1133-4.
35. Непеина К.С., Матюков В.Е. Развитие методики визуального сопоставления результатов азимутального магнитотеллурического мониторинга с параметрами сейсмических событий. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2022;2(2):150-157. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-2-150-157.
36. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М: Диалог-МГУ, 1997:161 с.
37. Забинякова О.Б., Рыбин А.К. Программа MTDataVar расчета вариаций мониторинговых магнитотеллурических данных. Свидетельство на программу ЭВМ; RU 2023686394 Роспатент. 2023.
38. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Александров П.Н., Непеина К.С. Электромагнитные исследования современных геодинамических процессов литосферы областей внутриконтинентальной орогении, на примере Тянь-Шаня. *Физика Земли*. 2022;5:98-115. DOI: 10.31857/S0002333722050234.
39. Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Рыбин А.К., Александров П.Н., Матюков В.Е., Непеина К.С., Забинякова О.Б., Казначеев П.А. Теоретические обоснования исследований деформационных процессов в литосфере Земли на основе сейсмических и электромагнитных полей эндогенного происхождения. Математическое моделирование процессов и систем. Коллективная монография по материалам пленарных докладов VIII Международной молодежной научно-практической конференции 4-7 октября 2018 г. Ч. I / С.А. Мустафина (отв. ред.). Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ. 2018:95-122.
40. Александров П.Н., Баталева Е.А. Программа разделения электромагнитного поля по положению источников по данным магнитотеллурических зондирований. RU 2019618606. Роспатент. 2019.

References

- Rybin AK, Batalev VYu, Bataleva EA, et al. Application features of magnetotelluric and magnetic-variation sounding methods in the Tien Shan mountains. *Science and Technological Developments*. 2023;102. No. 2-3:4-39. DOI: 10.21455/std2023.2-3-1 (in Russian).
- Cardoso LH, Bacellar LDAP. Assessment of geoelectrical configurations using reduced physical models for the structural mapping of rock mass and fractured aquifers. *Journal of Applied Geophysics*. 2021;191:104368. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104368.
- Nevedrova NN, Ponomarev PV. Multi-year monitoring results of electrophysical parameters in Altai mountains seismoactive area by direct current resistivity methods. *Interexpo GEO-Siberia*. 2018;3:281-287. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-3-281-287.
- Nevedrova NN, Shalaginov AE. Monitoring of electromagnetic parameters in the seismic activity zone of Gornii Altai. *Journal of geophysics*. 2015. No. 1:31-40 (in Russian).
- Trapeznikov YuA, Andreeva EV, Batalev VYu, et al. Magnetotelluric soundings in the Kyrgyz Tien Shan mountains. *Physics of the Solid Earth*. 1997;1:3-20 (in Russian).
- Batalev VYu, Berdichevsky MN, Golland ML, et al. Interpretation of deep magnetotelluric soundings in the Chuya intermontane depression. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 1989;9:42-45 (in Russian).
- Batalev VYu, Bataleva EA, Matyukov VE, et al. Study of irreversible deformations in the Tien Shan lithosphere based on magnetotelluric data (methodological aspect). *Bulletin of Kamchatka regional association «Educational-scientific center»*. *Earth sciences*. 2019;2(42):42-56 (in Russian) DOI: 10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56.
- Batalev VYu, Volykhin AM, Rybin AK, et al. The structure of the Earth's crust in the eastern part of the Kyrgyz Tien Shan according to the data of the Moscow Geophysical Survey and the State Geophysical Center. Chapter 8. *Manifestations of geodynamic processes in geophysical fields*. Moscow: Nauka; 1993:96-112 (in Russian).
- Bataleva EA, Mukhamadeeva VA. Complex electromagnetic monitoring of geodynamic processes in the Northern Tien Shan (Bishkek Geodynamic Test Area). *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018;9(2):461-487. DOI: 10.5800/GT-2018-9-2-0356. (in Russian)

10. Rybin AK, Batalev VYu, Il'chev PV, et al. Magnetotelluric and magnetovariational studies of the Kyrgyz Tien Shan. *Russian Geology and Geophysics*. 2001;42 (10):1566-1173 (in Russian).
11. Rybin AK, Spichak VV, Batalev VYu, et al. Array magnetotelluric soundings in the active seismic area of Northern Tien Shan. *Russian Geology and Geophysics*. 2008. 49(5):337-349(in Russian). DOI: 10.1016/j.rgg.2007.09.014.
12. Rybin AK, Bataleva EA, Batalev VYu, et al. Variations in the electrical resistivity of the Earth's crust based on the results of magnetotelluric monitoring of seismically active zones of the Tien Shan. *Vestnik KRSU*. 2011;11(4):29–40 (in Russian).
13. Zhamaletdinov AA, Mitrofanov FP, Tokarev AD, et al. The influence of lunar and solar tidal deformations on electrical conductivity and fluid regime of the Earth's crust. *Doklady Earth Sciences*. 2000;371:403-407(in Russian).
14. Rybin AK, Bataleva EA, Nepeina KS, et al. Volumetric and spatial segmentation of the Tien Shan lithosphere according to geophysical data. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2021;12(3):508–543. DOI: 10.5800/GT-2021-12-3-0537. (in Russian).
15. Bataleva EA. The results of monitoring the zones of dynamic influence of the fault structures of the Northern Tien Shan. *Interexpo GEO-Siberia*. 2022;2(2):332-339 (in Russian).
16. Bataleva EA, Batalev VY, Rybin AK. On the question of the interrelation between variations in crustal electrical conductivity and geodynamical processes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2013;49(3):402-410. DOI: 10.1134/S1069351313030038.
17. Bragin VD. Electromagnetic studies of the effects caused by a powerful industrial explosion in the area of the Naryn cascade of hydroelectric power plants (Kambarata). *Vestnik KRSU*. 2011;11(4):46–53 (in Russian).
18. Bataleva EA, Batalev VYu. Development of programs to analyze the data on azimuthal magnetotelluric monitoring Part 1. Analysis of magnetotelluric monitoring data. *Journal "Herald of KRSU"*. 2014;14(7):3-7 (in Russian).
19. Bataleva EA, Batalev VYu. Development of programs to analyze the data on azimuthal magnetotelluric monitoring Part 2. Development of software for analysis of MT-monitoring data. *Journal "Herald of KRSU"*. 2014;14(7):8-12 (in Russian).
20. Bataleva EA, Batalev VYu. Detailed retrospective analysis of magnetotelluric monitoring data (Bishkek Geodynamic Test). *Journal "Herald of KRSU"*. 2017;17(12):141-144 (in Russian).
21. Bataleva EA. Processing, analysis and interpretation of time-frequency series for magnetotelluric monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2019th International Symposium on Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects*. 2019;350:012053. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012053.
22. Bataleva EA, Batalev VYu. The results of an analysis of the Kambarata experiment with attraction synchronous measurement technique. *Journal "Herald of KRSU"*. 2017;17(1):181-184 (in Russian).
23. Rybin A, Bataleva E, Nepeina K, et al. Response of cracking processes in variations of geophysical fields. *Journal of Applied Geophysics*. 2020;181:104144. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104144.
24. Nepeina K, Bataleva E, Alexandrov P. Electromagnetic Monitoring of Modern Geodynamic Processes: An Approach for Micro-Inhomogeneous Rock through Effective Parameters. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023;13(14):8063. DOI: 10.3390/app13148063.
25. Yalov TV. Electrical anisotropy of horizontally inhomogeneous media. Candidate's dissertation (Engineering). Lomonosov Moscow State University. 2014:106 (in Russian).
26. Shalaginov AE, Nevedrova NN, Sanchaa AM, et al. Electrical anisotropy according to dc methods in the Bystrovka field area (shore reservoir in the Novosibirsk region). *Interexpo GEO-Siberia*. 2019;2(2):158-164 (in Russian).
27. Suhorukova KV, Petrov AM. Electrical anisotropy of terrigenous deposits: a brief overview of approaches to its determination from electrical logging data in vertical wells. *Russian Journal of Geophysical Technologies*. 2021;3:41-66. DOI: 10.18303/2619-1563-2021-3-41. (in Russian)
28. Luo T, Hu X, Chen L, et al. Investigating the Magnetotelluric Responses in Electrical Anisotropic Media. *Remote Sens*. 2022;14:2328. DOI: 10.3390/rs14102328.
29. Busby J. The application of time-lapse azimuthal apparent resistivity measurements for the prediction of coastal cliff failure. *Journal of Applied Geophysics*, 2006;59(4):261-272. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2005.10.004.
30. Salam R, Parnadi WW. Laboratory-scaled Azimuthal Resistivity Survey for Fracture Detection. *IOP Conf. Ser: Earth Environ. Sci*. 2021;873:012079. DOI: 10.1088/1755-1315/873/1/012079.

31. Gasimov E, Pekşen E, Durdağ D, et al. Modeling and interpretation of electrical resistivity data in anisotropic media using a generalized regression neural network: A case study on the Lokbatan mud volcano, Azerbaijan. *Journal of Applied Geophysics*. 2024;224:105365. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2024.105365.
32. Nepeina KS, Valuyskiy AYu. *Technological approach to separating continuous magnetotelluric sounding data for seismoelectromagnetic studies. Modern engineering and technology in scientific research*. Bishkek: Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, 2021:159–167 (in Russian).
33. Internet site Nord-West Ltd [https://nw-geo.ru/] (Date of access 21.11.2024).
34. Zorin N, Aleksanova E, Shimizu H, et al. Validity of the dispersion relations in magnetotellurics: Part I-theory. *Earth, Planets and Space*. 2020;72(1):9. DOI: 10.1186/s40623-020-1133-4.
35. Nepeina KS, Matiukov VE. Upgrading of a technique for visual comparing for the results of azimuthal magnetotelluric monitoring with the seismic events parameters. *Interexpo GEO-Siberia*. 2022;2(2):150-157 (In Russian). DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-2-150-157.
36. Berdichevskii MN, Dmitriev VI, Novikov DB, et al. Analysis and Interpretation of the Magnetotelluric Data. *Dialog-MGU, Moscow*. 1997:161(In Russian).
37. Zabinyakova OB, Rybin AK. Программа MTDDataVar расчета вариаций мониторинговых магнитотеллурических данных. Software RU 2023686394 Rospatent. 2023 (In Russian).
38. Rybin AK, Bataleva EA, Aleksandrov PN, Nepeina KS. Electromagnetic studies of present geodynamic processes in the lithospheres of the regions of intracontinental orogeny: the Tien Shan example. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022;58(5):690-705. DOI: 10.1134/s1069351322050093.
39. Batalev, V.Yu., Bataleva, E.A., Rybin, A.K., Aleksandrov, P.N., Matiukov, V.E., Nepeina, K.S., Zabinyakova, O.B., and Kaznacheev, P.A., Theoretical substantiation of studies of deformation processes in the Earth's lithosphere based on seismic and electromagnetic fields of endogenous origin, Mater. VIII Mezhdunar. molodezhnoi nauchn.-prakt. konf.: Matematicheskoe modelirovanie protsessov i sistem, Ch. 1 (Proc. VIII Int. Youth Sci. Appl. Res. Conf.: Mathematical Modeling of Processes and Systems, Part 1), Mustafina, S.A., Ed., Sterlitamak, 2018, Sterlitamak: Sterlitamakskii filial BashGU. 2018:95-122 (in Russian).
40. Aleksandrov PN, Bataleva EA. Программа razdeleniya elektromagnitnogo polya po polozeniyu istochnikov po dannym magnetotelluricheskikh zondirovaniy. RU 2019618606. Rospatent. 2019.

Об авторах

НЕПЕИНА Ксения Сергеевна – с.н.с. ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкеке, г. Бишкек, Кыргызстан, ORCID: 000-0003-0725-8023, ResearcherID: A-9203-2014, Scopus Author ID: 56241170100, SPIN: 1665-8376
e-mail: nepeina.k@mail.ru

БАТАЛЕВА Елена Анатольевна – зав. лаб., в.н.с. ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкеке, г. Бишкек, Кыргызстан, ORCID: 0000-0002-0279-7469, ResearcherID: AAB-1316-2020, Scopus Author ID: 10043212200, SPIN: 4666-1058
e-mail: elena.bataleva@gmail.com

About the authors

Kseniia S. NEPEINA – Senior scientific researcher, Research Station RAS in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan, ORCID: 000-0003-0725-8023, ResearcherID: A-9203-2014, Scopus Author ID: 56241170100, SPIN: 1665-8376
E-mail: nepeina.k@mail.ru

Elena A. BATALEVA – Head of the Laboratory, Lead scientific researcher, Research Station RAS in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan, ORCID: 0000-0002-0279-7469, ResearcherID: AAB-1316-2020, Scopus Author ID: 10043212200, SPIN: 4666-1058
E-mail: elena.bataleva@gmail.com

Вклад авторов

Непеина К.С. – разработка концепции, написание оригинального текста, редактирование рукописи, визуализация

Баталева Е.А. – написание оригинального текста, методология, верификация данных, проведение исследования, администрирование данных, получение финансирования

Authors' contribution

Nepeina K.S. – conceptualization, writing original draft, editing, visualization

Bataleva E.A. – writing original draft, methodology, validation, investigation, data curation, funding acquisition

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Submitted 05.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 28.11.2025

Принята к публикации / Accepted 24.12.2025