

Развитие методики визуального сопоставления результатов азимутального магнитотеллурического мониторинга с параметрами сейсмических событий

К. С. Непейна^{1}, В. Е. Матюков¹*

¹ Научная станция РАН, г. Бишкек,
Республика Кыргызстан

* e-mail: neks@gdirc.ru

Аннотация. В работе представлена практическая реализация задачи визуализации дополнительной геофизической информации для анализа результатов азимутального магнитотеллурического (МТ) мониторинга. Основываясь на результатах предыдущих исследований взаимосвязи вариаций кажущегося сопротивления ($\Delta\rho_k$) для пунктов МТ мониторинга в зависимости от местоположения и класса происходящих сейсмических событий представляется целесообразным привести наглядные примеры, доказывающие подобные случаи. Для этого предлагается совершенствование технологии построения дополнительных графиков, содержащих такие параметры сейсмических событий как: глубина очага, расстояние между очагом и пунктом наблюдений, азимут и энергетический класс, в соответствии с временем наблюдений. Все параметры землетрясений взяты из опубликованных сейсмических каталогов. Показан способ отображения псевдоразрезов $\Delta\rho_k$, совмещенные с графиком распределения гипоцентров, в программе Surfer. Приведен пример графика, содержащего одновременно информацию об удаленности и азимуте события относительно пункта мониторинга, в виде повернутых стрелок. Графические построения максимально автоматизированы, и позволяют интерпретатору подтвердить доводы в пользу пространственно-временной зависимости вариаций электромагнитных параметров от происходящих событий в наблюдаемой части земного пространства.

Ключевые слова: азимутальный магнитотеллурический мониторинг, каталог землетрясений, псевдоразрез

Upgrading of a Technique for Visual Comparing for the Results of Azimuthal Magnetotelluric Monitoring with the Seismic Events Parameters

K. S. Nepeina^{1}, V. E. Matiukov¹*

¹ Research Station RAS, Bishkek, Kyrgyzstan

* e-mail: neks@gdirc.ru

Abstract. The paper presents a practical implementation of the task of visualizing additional geophysical information for analyzing the results of azimuthal magnetotelluric (MT) monitoring. Since some patterns of a sharp change in the sign of relative apparent resistivity variations ($\Delta\rho_k$) for MT monitoring points depending on ongoing seismic events, as well as lunar-solar tides, were found in previous studies, it became necessary to give illustrative examples proving such cases. For this, we propose to improve the technique for constructing additional graphs containing such parameters of seismic events as: source depth, distance between the source and the observation point, azimuth and energy class, in accordance with the observation time. All parameters are obtained from published seismic catalogs. A method for displaying pseudosections $\Delta\rho_k$, combined with a hypocenter distribution plot, in Surfer program is shown. An example of a graph containing simultaneously

information about the distance and azimuth of the event relative to the monitoring point, in the form of rotated arrows, is given. Such graphical constructions are maximally automated, and allow the interpreter to confirm the arguments in favor of the spatial-temporal dependence of the variations of electromagnetic parameters on the events occurring in the observed earth's interior.

Keywords: azimuthal magnetotelluric monitoring, catalog of earthquakes, apparent resistivity

Введение

Лаборатория глубинных магнитотеллурических исследований Научной станции РАН в г. Бишкеке выполняет магнитотеллурический (МТ) мониторинг на стационарных и режимных пунктах регистрации на территории Центрального Тянь-Шаня с 2003 года [1-5]. Для проведения мониторинга используются аппаратные комплексы Phoenix MTU-5 (Canada). С 2010 г. была разработана и внедрена методика азимутального МТ мониторинга [1-3]. Основным преимуществом такого подхода к мониторингу является возможность изучения вариаций электромагнитных параметров (ρ_k и др.) при повороте системы наблюдения [6-7]. Анализ результатов позволяет выделить аномальные изменения электромагнитных параметров, а также определить направления, соответствующие их максимальным положительным и отрицательным вариациям (оси сжатия и растяжения). Развитие методики практического сопоставления результатов азимутального МТ мониторинга с указанием параметров сейсмических событий связано с временной динамикой измеряемых параметров.

В предыдущих исследованиях были найдены некоторые закономерности резкой смены знака вариаций кажущегося сопротивления $\Delta\rho_k$ от происходящих сейсмических событий и лунно-солнечных приливов [4-5,8-9]. Было продемонстрировано, что «существует факт приуроченности сейсмических событий к участкам частотно-временных рядов (ЧВР) с высокими градиентами электромагнитных параметров, т.е. интервалам времени, когда согласно концепции перераспределения флюидов, происходит значительное изменение напряженно-деформированного состояния массивов горных пород верхней части земной коры» [4]. Таким образом, причины аномальных изменений электромагнитных параметров на ЧВР, вычисленных для всей совокупности периодов и азимутов, обладают различной природой. Соответственно, информация о произошедших землетрясениях (удаленность, энергетический класс, глубина) может быть использована для оценки чувствительности измеряемых параметров на различных пространственно-масштабных уровнях. Совершенствование технологии визуализации результатов азимутального МТ мониторинга, дополненных параметрами сейсмических событий представляет наибольший интерес в данной работе.

Методы и материалы

Для расчета азимутальных МТ кривых используется программа GraphBuilder. При выполнении расчетов значений компонент тензора импеданса и для построения их азимутальных кривых (α – азимут поворота системы, T – период зондирования $0.01 \leq T \leq 100$ с, Z – магнитотеллурический импеданс) используются формулы [10-11]:

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

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

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

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

Формула (5) используется для построения кривых кажущегося сопротивления (рис. 1):

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

а формула (6) – для построения соответствующих азимутальных кривых:

$$\rho_m^\alpha(T) = \frac{T |Z_m^\alpha(T)|^2}{2\pi\mu_0}, \quad m = xx, xy, yx, yy. \quad (6)$$

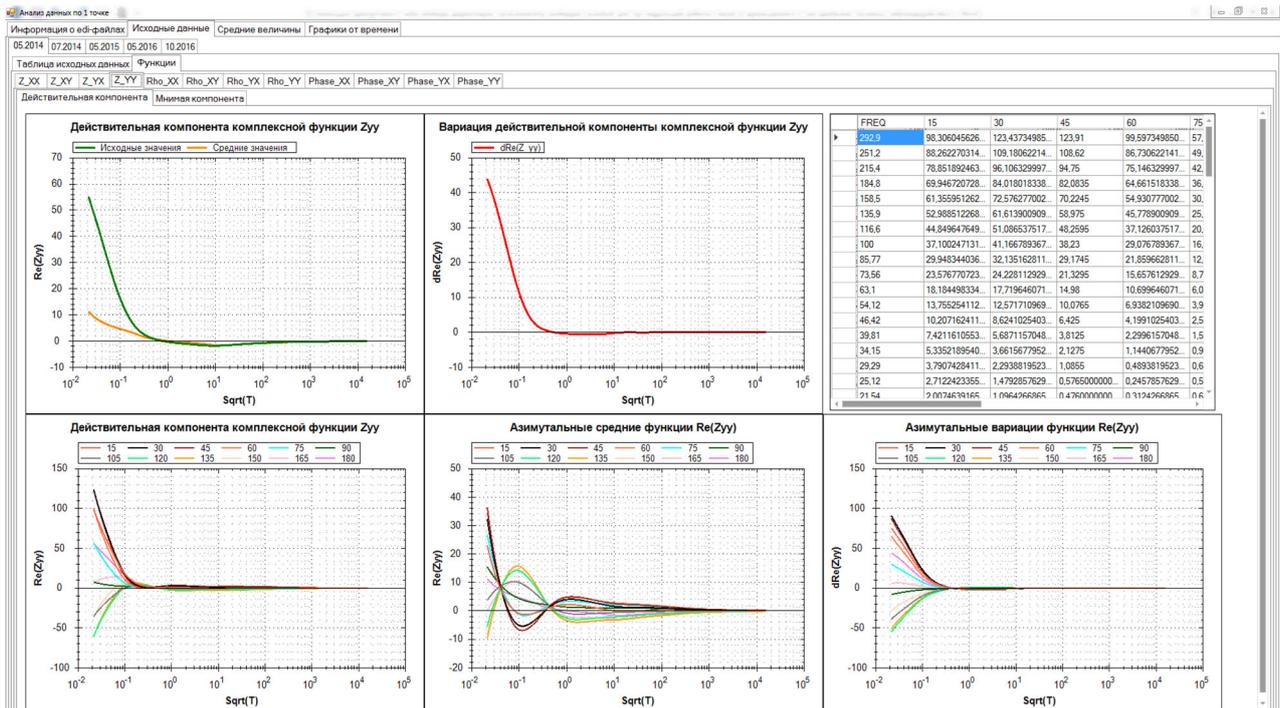


Рис. 1. Режим анализа данных (кривых кажущегося сопротивления ρ_k) по одной точке для профильного МТ мониторинга в программе GraphBuilder

В программе Surfer (Golden Software, USA) визуализируют результаты азимутального МТ мониторинга после обработки в программе GraphBuilder. Способ представления численных результатов представляет собой превдоразрезы или

частотно-временные ряды вариаций ρ_k (ЧВР) [12-13]. Для их построения используется команда построения карты 'map'=> 'contour map', где по оси X отложено время наблюдений с шагом 1 час, а по оси Y – логарифм периода зондирования (от -2 с до 2). По оси Z на плоскости цветом обозначены вариации значений электромагнитных параметров. Каждый псевдоразрез соответствует определенному углу поворота системы (с шагом 15°). Такой способ представления данных МТ-мониторинга позволяет анализировать процесс изменения электрических параметров геосреды и опосредованно её напряженно-деформированного состояния сразу по четырём измерениям: 1) азимут (направление в плане), 2) период зондирования (мера глубины), 3) амплитуда изменения электрических параметров горных пород, 4) время.

В программе [14] производится вычисление энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения [15] и строится график, где по оси X – время в часах, по оси Y – амплитуда электромагнитного поля эндогенного происхождения в относительных единицах.

Отдельно рассчитывается вертикальная компонента лунно-солнечных приливов A_n в программе TIDE.exe. В итоге получают график, где по оси X расположено время в часах, по оси Y – амплитуда компоненты A_n в единицах $\cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$.

Все исходные параметры очагов землетрясений Тянь-Шаня (время в очаге (T_0), географические координаты (λ° , φ°), глубина (D), энергетический класс (K)) берутся из международных каталогов, например, KNET (НС РАН в г. Бишкеке), KRNET (Институт сейсмологии НАН КР), NNC (Институт геофизических исследований НЯЦ РК) и ISC (Международный сейсмологический центр, Великобритания) [16]. Сначала отметки землетрясений или взрывов (например, Камбарата) наносились на псевдоразрезы поверх рисунка в виде линий по оси времени в соответствии с временем события в очаге [17]. Затем было предложено дополнять ЧВР графиком энергетических классов (K) и азимутом (A_z , углом - между пунктом мониторинга и сейсмическим событием). В данном исследовании предлагается также дополнять псевдоразрезы глубиной очага (D) и расстоянием между очагом и пунктом наблюдений (R) с учетом расчетного времени относительно начала записи ($T_s=T_0-T_{MT}$) [18]. Для анализа взаимосвязи с пространственно-временным распределением сейсмичности был применен алгоритм для пересчета параметров очагов землетрясений (относительных координат и времени от начала записи) [19]. Для совместного отображения гипоцентров сейсмических событий на псевдоразрезах их глубина (D) преобразуется в параметр эффективной глубины (lgT), связанный с периодом (T) МТ зондирования. Преобразование действует по следующему правилу: если $D < 5$, то $lgT = 1.8$; если $5 \leq D < 8$, то $lgT = 1.5$; если $8 \leq D < 11$, то $lgT = 1$; если $11 \leq D < 15$, то $lgT = 0$; если $15 \leq D < 20$, то $lgT = -1.5$; если $D > 25$, то $lgT = -2$. Пример подготовленного табличного файла, содержащего эти параметры, показан в таблице.

Пример параметров сейсмических событий, необходимых для анализа

T_0 дд.мм.гггг чч:мм:сс.0	λ°	φ°	D, км	K	T_s , час	lgT	R, км	Az°
22.10.2021 14:20:16.1	42.563	76.076	3.54	6.97	5.337778	1.8	143	15
23.10.2021 13:02:33.0	43.291	75.067	14.39	8.2	28.0425	0	75	200

Способ нанесения параметров землетрясений на ЧВР азимутального МТ мониторинга в программе Surfer выглядит следующим образом:

1. На псевдоразрез с помощью кнопки ‘add map’=> ‘classed post map’ добавляется график распределения гипоцентров землетрясений во времени. По оси X откладывают время наблюдений, а по оси Y – логарифм периода зондирования **lgT**, который напрямую связан с глубиной (имеет значения от -2 до 2). При этом гипоцентры показаны символами. Благодаря опции классификации карты (‘classed’), размер символа пропорционален энергетическому классу события. Масштаб символов, например, звездочек, задается оператором произвольно и указывается в легенде построенной карты. Таким образом, получается совмещенный рисунок – гипоцентры землетрясений, связанные с вариациями определенного электромагнитного параметра.

2. Вертикальными линиями (опцией ‘insert line’) отмечаются моменты сейсмических событий вдоль оси времени МТ мониторинга. Основание линий берет начало от построенных символов гипоцентров землетрясений.

3. Отдельно строится график, содержащий два параметра землетрясений – расстояние между очагом и пунктом наблюдений (**R**) и азимутом (**Az**, углом - между пунктом мониторинга и сейсмическим событием). В Surfer используется функция ‘add map’=> ‘post map’. По оси X откладывают время наблюдений относительно начала записи времени ($T_s=T_0-T_{MT}$), а по оси Y – расстояние R в километрах. Для отметки выбираются стрелки (Symbol 61), при этом основание стрелки – значение R, конец стрелки направлен по азимуту Az (рис. 2). Поворот стрелки осуществляется в разделе свойств графика (‘Properties’) во вкладке ‘Symbol’ функцией ‘Symbol Angle’, где выбирается столбец значений Az в поле ‘angle column’.

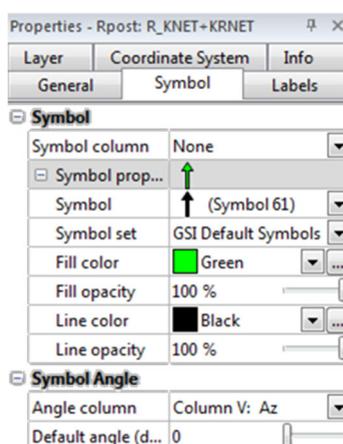


Рис. 2. Вид окна настроек программы Surfer. Раздел (‘Properties’ для ‘Post map’), где показаны свойства и тип отображения стрелок на графике

Результаты

На рис. 3 представлен пример полученных графиков. Можно сделать вывод, что такой вид графиков удобен для визуального сопоставления вариаций анизотропных свойств электрического сопротивления с изменчивостью в поведении энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения, лунно-солнечными приливами и происходящими сейсмическими событиями (на удалении до 1000 км от пункта мониторинга).

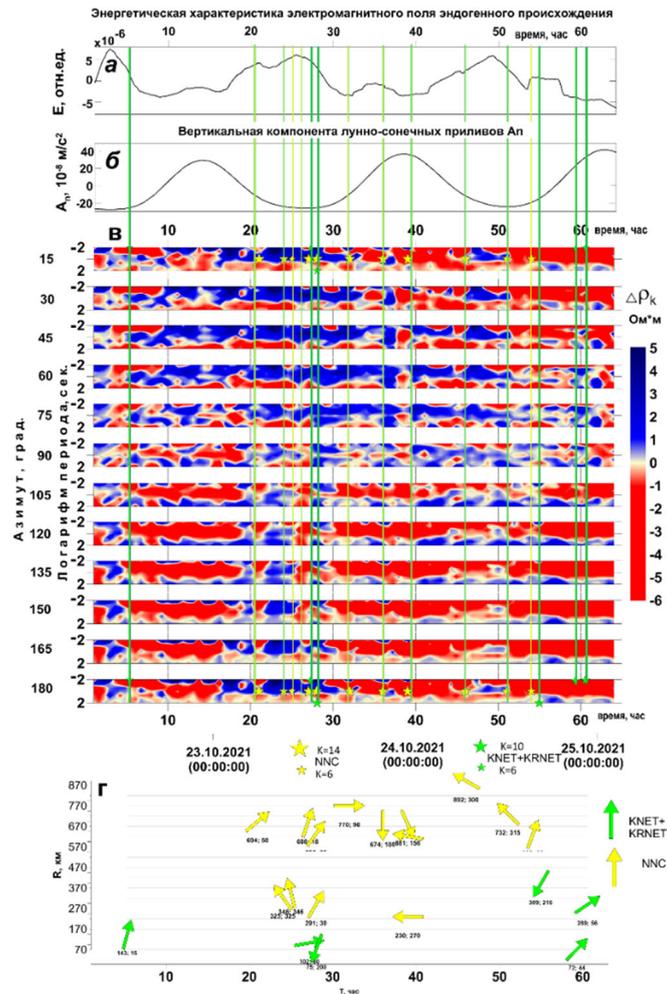


Рис. 3. Пример результатов азимутального МТ мониторинга с приведенными параметрами сейсмических событий, произошедших в период наблюдений (22.10.2021-25.10.2021): (а) эндогенная характеристика электромагнитного поля, (б) вертикальная компонента лунно-солнечных приливов A_n , (в) псевдоразрезы с шагом поворота 15° (ЧВР Δp_k), (г) графическое изображение удаленности сейсмических очагов и их относительное пространственное расположение. Сейсмические каталоги: Киргизии (KNET+KRNET), Казахстана (NNC)

Анализ рис. 3 требует отдельного исследования, однако уже на данном этапе визуального сопоставления можно обнаружить смену знака вариаций Δp_k (от -6 до +5) в областях часов: 5, 20, 22, 26, 30, 40, 48, 59. Смена – наблю-

дается как в верхней части разреза по всем азимутам поворота, так и в нижней. Есть также смена во времени в зависимости от азимута поворота или азимута на эпицентр - реакция МТ наблюдений на сейсмические события.

Заключение

По результатам анализа частотно-временных рядов вариаций электромагнитных параметров можно отчетливо выделить их контрастные изменения на некоторых временных отрезках, которым находится объяснение при наличии соответствующих факторов, например, глубинности сейсмических событий или их удаленности.

Таким образом, можно выделить основные типы связей смены знака вариаций: 1) глубина гипоцентра влияет на проявление вариаций в нижней/верхней части псевдоразреза (по глубине) в зависимости от азимута поворота; 2) класс землетрясения влияет на продолжительность изменения $\Delta\rho_k$ (во времени); 3) землетрясения, расположенные под определенным азимутом между направлением на север и на эпицентр, вне зависимости от удаленности, влияют на смену знака вариаций (что было доказано на пример пункта Аксу для угла 57° [4]); 4) влияние лунно-солнечных приливов на порово-трещинное пространство обуславливает смену знака вариаций; 5) изменения в поведении ЧВР зачастую приурочены к экстремумам лунно-солнечных приливов.

Предложенный способ визуализации пространственно-временного распределения определенных параметров сейсмических событий для сопоставления с результатами азимутального магнитотеллурического мониторинга является новым дополнительным инструментом анализа и помогает интерпретатору наглядно изучать вариации измеряемых компонент электромагнитного поля.

Благодарности

Исследование выполняется по темам государственного задания НС РАН № ЕГИСУ НИОКТР АААА-А20-120102190009-9 и № Минобрнауки России 1021052806454-2-1.5.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. Проявление геодинамических процессов в вариациях электропроводности (по результатам магнитотеллурических исследований) // В сб.: Современное состояние наук о Земле: материалы международной конференции, посв. Памяти В.И. Хаина. Изд-во МГУ. – 2011. – С. 193-198.
2. 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 КРСУ. – 2011. – Т. 11. – № 4. – С. 29-40.
3. Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов // Физика Земли. – 2013. – № 3. – С. 105-113.
4. Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженно-деформированного состояния среды // Геофизические исследования. – 2014. – Т. 15. – № 4. – С. 54-63.
5. 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. – 104144. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104144>.

6. Busby J.P. The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations // *Geophysical Prospecting*. – 2000. – Vol. 48. – P. 677–695.
7. Semenov V., Petrishchev M. Electromagnetic monitoring // *GeoPlanet Earth Planet. Sci.* – 2018. – Is. 9783319537948. – P. 79–100. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-53795-5_5/FIGURES/16.
8. Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Шапаренко И.О. Вариации электрофизических параметров по данным электромагнитного мониторинга как индикатор активности разломных зон // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 93-107. – <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0339>.
9. Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // *Геофизика*. – 2015. – № 1. – С. 31-40.
10. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. – М. : Недра, 1992. – 250 с. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56>.
11. Mahallati A.R., Montahaei M. Application of MT Forward Modeling Responses for Time-Lapse Monitoring of the Subsurface Electrical Resistivity Changes // *J. Earth Sp. Phys.* – 2021. – Vol. 46. – No. 4. – P. 1–12. – <https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.279194.1007107>.
12. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга. Часть 1. Анализ данных магнитотеллурического мониторинга // *Вестник КРСУ*. – 2014. – Т. 14. – № 7. – С. 3-7.
13. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга. Часть 2. Разработка программного обеспечения для анализа данных МТ-мониторинг // *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*. – 2014. – Т. 14. – № 7. – С. 8-12.
14. Александров П.Н., Баталева Е.А. Программа разделения электромагнитного поля по положению источников по данным магнитотеллурических зондирований / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019618606. – М., 2019. – 1 с.
15. 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 КРАУНЦ*. – 2019. – № 2(42). – С. 42-56. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56>.
16. Каталог ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue. Version 7.0. Дата обращения 12.01.2022. <https://doi.org/10.31905/D808B825>.
17. Матюков В.Е., Баталева Е.А., Непеина К.С. О новых возможностях в изучении необратимых деформаций литосферы Тянь-Шаня // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 189-196. – <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060132>.
18. Матюков В.Е., Непеина К.С. Анализ вариаций геофизических параметров и сейсмических событий в пункте глубинного магнитотеллурического зондирования // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2021. – Т. 1. – С. 144-150. – <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-1-144-150>.
19. Непеина К.С. Алгоритм обработки сейсмических каталогов для целей визуального анализа их пространственно-временных характеристик // *Современные техника и технологии в научных исследованиях: сборник материалов XIII Международной конференции молодых ученых и студентов, Бишкек, 28–30 апреля 2021 года*. – Бишкек: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке. – 2021. – С. 153-158.

© К. С. Непеина, В. Е. Матюков, 2022