



ANOMALIES IN THE BEHAVIOR OF COMPONENTS OF THE EARTH'S ELECTROMAGNETIC FIELD AND THEIR RELATIONSHIP TO EARTHQUAKES ACCORDING TO MAGNETOTELLURIC MONITORING DATA

E.A. Bataleva , V.E. Matiukov , K.S. Nepeina 

Research Station, Russian Academy of Science, Bishkek 720049, Kyrgyzstan

ABSTRACT. When studying the relationship between electromagnetic and deformation processes, according to the results of magnetotelluric monitoring, electromagnetic pulses were detected, which may be associated with the earthquakes that occurred. The observations were carried out at two magnetotelluric stationary monitoring points located in the Chu depression (Aksu 42.60911 °N, 74.00833 °E; Chon-Kurchak 42.62828 °N, 74.60671 °E, Northern Tien Shan), on the territory of the Bishkek geodynamic polygon. To identify earthquake responses, the results of instrumental observations of the electromagnetic effects of a strong earthquake and its aftershocks that occurred in northern China on January 22, 2024 with a magnitude in the range of 4.9–6.9, a weaker one with a magnitude of 5.4 (Kyrgyzstan) and a number of powerful remote earthquakes with a magnitude in the range of 5.2–6.6 at a distance of 500–1200 km from the epicenter were analyzed. It is shown that an earthquake with numerous aftershocks located at distances from ~450 km from the registration points is reflected in all recorded parameters, while a weaker earthquake, but located closer, does not manifest itself in one of the horizontal components of the electromagnetic field. The mechanisms of occurrence of seismoelectric signals and mechanical-electromagnetic transformations in the Earth's crust are considered. The reality of the appearance of electromagnetic precursors of earthquakes and coseismic signals observed in the first tens of seconds or minutes after an earthquake is shown. The results of the research can be used in the development of methods for monitoring seismic activity in potentially dangerous regions.

KEYWORDS: natural electromagnetic field of the Earth; earthquake; magnetotelluric sounding; monitoring; coseismic response; Tien Shan

FUNDING: The study was carried out on the state assignment of the Research Station RAS (No. 1021052806445-4-1.5.1 and 1021052806454-2-1.5.1).



EDN: WTATOT

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Elena A. Bataleva, elena.bataleva@gmail.com

Received: September 1, 2024

Revised: November 5, 2024

Accepted: November 12, 2024

FOR CITATION: Bataleva E.A., Matiukov V.E., Nepeina K.S., 2025. Anomalies in the Behavior of Components of the Earth's Electromagnetic Field and Their Relationship to Earthquakes According to Magnetotelluric Monitoring Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (2), 0819. doi:10.5800/GT-2025-16-2-0819

АНОМАЛИИ ПОВЕДЕНИЯ КОМПОНЕНТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И ИХ СВЯЗЬ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ ПО ДАННЫМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Е.А. Баталева, В.Е. Матюков, К.С. Непейна

Научная станция РАН, 720049, Бишкек, Кыргызстан

АННОТАЦИЯ. При изучении взаимосвязи электромагнитных и деформационных процессов по результатам магнитотеллурического мониторинга обнаружены электромагнитные импульсы, которые, возможно, связаны с произошедшими землетрясениями. Наблюдения выполнены в двух пунктах магнитотеллурического мониторинга, расположенных в Чуйской впадине (Аксу 42.60911 с.ш., 74.00833 в.д.; Чон-Курчак 42.62828 с.ш., 74.60671 в.д., Северный Тянь-Шань) на территории Бишкекского геодинимического полигона. Для выявления откликов землетрясений анализировались результаты инструментальных наблюдений за электромагнитными эффектами сильного землетрясения и его афтершоков, произошедших на севере Китая 22.01.2024 г. с магнитудой в интервале 4.9–6.9, более слабого с магнитудой 5.4 (Кыргызстан) и ряда мощных удаленных землетрясений с магнитудой в интервале 5.2–6.6 на расстоянии 500–1200 км от эпицентра. Показано, что землетрясение с многочисленными афтершоками, произошедшими на расстояниях от ~450 км от пунктов регистрации, отражается во всех регистрируемых параметрах, в то время как более слабое землетрясение, происходящее ближе, не проявляется в одной из горизонтальных компонент электромагнитного поля. Рассмотрены механизмы возникновения сейсмоэлектрических сигналов и механоэлектромагнитных преобразований в земной коре. Показана реальность появления электромагнитных предвестников землетрясений и косейсмических сигналов, наблюдаемых в первые десятки секунд или первые минуты после землетрясения. Результаты исследований могут найти применение при разработке методов контроля за сейсмической активностью в потенциально опасных регионах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: естественное электромагнитное поле Земли; землетрясение; магнитотеллурическое зондирование; мониторинг; косейсмический отклик; Тянь-Шань

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено в рамках госзадания НС РАН (№№ 1021052806445-4-1.5.1, 1021052806454-2-1.5.1).

1. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость исследования современных геодинимических процессов обусловлена многогранностью их проявления в вариациях геофизических полей, связанных с сейсмичностью, активностью Солнца, деформациями земной коры, процессами подготовки землетрясений и т.д. Современные геодинимические процессы, как правило, наиболее ярко отражаются в вариациях электромагнитного поля Земли, изучение которых имеет важное значение для понимания их внутренних механизмов, поскольку вариации содержат важную информацию, которая востребована при разработке моделей взаимодействий и преобразования геофизических полей [Barsukov, Sorokin, 1973; Sidorin, 1992; Sobolev, Ponomarev, 2003; Zavyalov, 2006; Silva et al., 2006; Bataleva et al., 2013; Bataleva, 2016; Zhu et al., 2016; Bataleva, Mukhamadeeva, 2018; Zilio, Ampuero, 2023]. Основными задачами комплексных геофизических исследований современных геодинимических процессов на предмет поиска и изучения геофизических и деформационных предвестников землетрясений являются разработка и внедрение новых технологий сбора, обработки и интерпретации геофизических данных в сейсмоактивных регионах. При этом первостепенное значение для решения поставленных перед учеными задач имеют исследования, направленные непосредственно на мониторинг физических параметров

геологической среды [Gubatenko et al., 2000; Stanica D., Stanica M., 2007; Rybin et al., 2008, 2016, 2023; Rybin, 2011; Telesca, 2012; Batalev et al., 2019; Nepeina et al., 2023; Nevedrova, Epov, 2012; Nevedrova et al., 2019; Shalaginov, Nevedrova, 2023].

Значительный объем инструментальных исследований глубинного строения и современной геодинимики Тянь-Шаня приходится на конец прошлого столетия. В 1978 г. по инициативе Академии наук СССР был создан геодинимический прогностический полигон, на котором в режиме мониторинга проводились электромагнитные, магнитометрические, геодезические, сейсмологические и GPS-наблюдения [Bragin et al., 1990, 1992, 2001; Batalev et al., 1993; Volikhin et al., 1993; Zubovich et al., 2001; Rybin et al., 2005]. Позже были выполнены исследования современной геодинимики территории Тянь-Шаня, в которых принимали участие зарубежные ученые [Abdrakhmatov et al., 1996; Safronov et al., 2004; Makarov et al., 2010; Zubovich et al., 2010; Sass et al., 2014; Rybin et al., 2016]. В настоящее время возможности изучения современных геодинимических процессов существенно расширились, появилась новая аппаратура и технологии, разработано программное обеспечение как для обработки полевых данных, так и для построения геофизических моделей, созданы открытые информационные ресурсы [Vladov, Sudakova, 2017; Bataleva et al., 2019; Zavyalov et al., 2020; Bataleva,

Nepeina, 2020; Lutikov et al., 2021; Nigmatullin et al., 2023; Guglielmi et al., 2022; Ibragimov et al., 2023], поэтому совершенствование технологии геофизического мониторинга современных геодинамических процессов в сейсмоактивных регионах путем привлечения новых данных к проблеме изучения и прогноза землетрясений актуально и своевременно.

С целью определения взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов Научной станцией РАН были проведены электромагнитные зондирования во время Камбаратинского взрыва [Bataleva et al., 2013, 2014]. Для обработки результатов зондирования была предложена методика азимутального магнитотеллурического (МТ) мониторинга, которая позволяет не только выделить аномальные изменения модуля и фазы кажущегося сопротивления, но и определить направления, соответствующие их максимальному увеличению и уменьшению (оси сжатия и растяжения) [Bataleva et al., 2013]. На основе анализа полевых материалов получено экспериментальное подтверждение концепции взаимосвязи напряженно-деформированного состояния среды с изменением кажущегося электросопротивления, обусловленной перераспределением минерализованных растворов между системами трещин. Согласно представлениям авторов, на глубинных уровнях земной коры преобладает флюидная концепция повышенной электропроводности, которая обусловлена наличием связанных поровых пространств, заполненных минерализованными рассолами и растворами [Bragin, Mukhamadeeva, 2009; Rybin et al., 2016]. Особое внимание при анализе приуроченности гипоцентров землетрясений к объектам аномальной электропроводности уделяется разломным зонам [Thompson et al., 2002; Novikov et al., 2008; Rybin et al., 2020; Bataleva, 2021, 2022; Nepeina, Bataleva, 2022]. Другими успешными примерами взаимосвязи вариаций электропроводности являются результаты мониторинговых исследований, выполненных в Кочкорской впадине Северного Тянь-Шаня. Показано, что в регистрируемых временных рядах электромагнитных параметров удается выделить характерные признаки изменений напряженно-деформированного состояния среды, обусловленных сейсмическими событиями [Bataleva et al., 2017; Przhiyalgovskii et al., 2018].

С целью обнаружения связи между геодинамическими процессами литосферы и ее деформационно-электромагнитным излучением была проведена синхронная регистрация электромагнитных сигналов на стационарных пунктах МТ мониторинга, расположенных в Чуйской впадине (Аксу 42.60911° с.ш., 74.00833° в.д.; Чон-Курчак 42.62828° с.ш., 74.60671° в.д., Северный Тянь-Шань) на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП) в предгорьях Киргизского хребта. Для обоих мониторинговых пунктов характерен достаточно низкий уровень техногенных помех и высокий уровень микросейсмической активности. При этом на пункте Аксу выполняются одновременные сей-

смические и электромагнитные наблюдения, что может быть использовано для решения ряда мониторинговых задач, одной из которых является изучение электромагнитного отклика земной коры на сейсмические события, что, в свою очередь, определяется механо-электрическими свойствами геологической среды.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАССМАТРИВАЕМЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

23 февраля 2023 г. в 00:37:38 UTC в Таджикистане (координаты 38.0552° с.ш., 73.2287° в.д.) произошло сильное землетрясение с магнитудой 6.9, эпицентр которого находился на глубине 9 км, примерно в 82 км от китайской границы и в 40 км восточнее озера Сарез, на расстоянии 145 км от границы Киргизии, 479 км – от пунктов МТ мониторинга Аксу и 419 км – Чон-Курчак (рис. 1) (по данным USGS).

К настоящему моменту для этого сильного землетрясения зарегистрировано 65 афтершоков. Самым сильным было землетрясение магнитудой 5.0, которое произошло через 58 мин после главного толчка (10.7 и 60.0 км от Мургаба, Таджикистан), в четверг, 23 февраля 2023 г. в 06:35 (время UTC+5). Последний афтершок произошел через полтора года после основного толчка в 99 км от Мургаба (Таджикистан) и имел магнитуду 4.1.

Учтурфанское землетрясение 22.01.2024 г., очаг которого находился в городе Айкол в Синьцзян-Уйгурском автономном районе Китая (широта 41.23° с.ш., долгота 78.59° в.д.), с магнитудой $M=7.00-7.27$ произошло в 18:09:05 UTC на глубине ~13 км (рис. 1). Очаг землетрясения находился на территории Китая (Южный Синьцзян) в хребте Кокшаал-Тау вблизи границы с Кыргызстаном. Расстояние от эпицентра землетрясения до Бишкека примерно 300 км. Многочисленные афтершоки с магнитудой 5.1, 5.5 и 5.0 наблюдались 23, 24, 30 января, 1 февраля, 3 февраля $M=5$, 12 февраля $M=4.5$. Интенсивность сотрясений на территории Бишкека и пригородов достигала 5 баллов. Землетрясение ощущалось на территории стран Центральной Азии (Кыргызстан, Казахстан, Узбекистан, Туркменистан, Таджикистан), в Азербайджане, Индии, России. Необходимо отметить, что сейсмичность в районе очага произошедшего землетрясения очень высокая. Самым сильным по историческим данным было Кашгарское землетрясение 1902 г. с магнитудой около 8, эпицентр которого находился в 200 км к юго-западу от очага землетрясения 22.01.2024 г.

Землетрясение магнитудой $m_b=5.4$ произошло 4 марта 2024 г. на границе Кыргызстана с Казахстаном (время в очаге 06:22:04.4 UTC). Подземные толчки зафиксированы в 12:22 по местному времени (UTC+6). Очаг землетрясения располагался в 35 км к северо-западу от города Чолпон-Ата, в 40 км к югу от Алматы, в 190 км к северу от Бишкека. Гипоцентр сейсмического события находился на глубине 10 км. Необходимо отметить, что землетрясение было зарегистрировано сейсмологическими сетями на территории стран Центральной

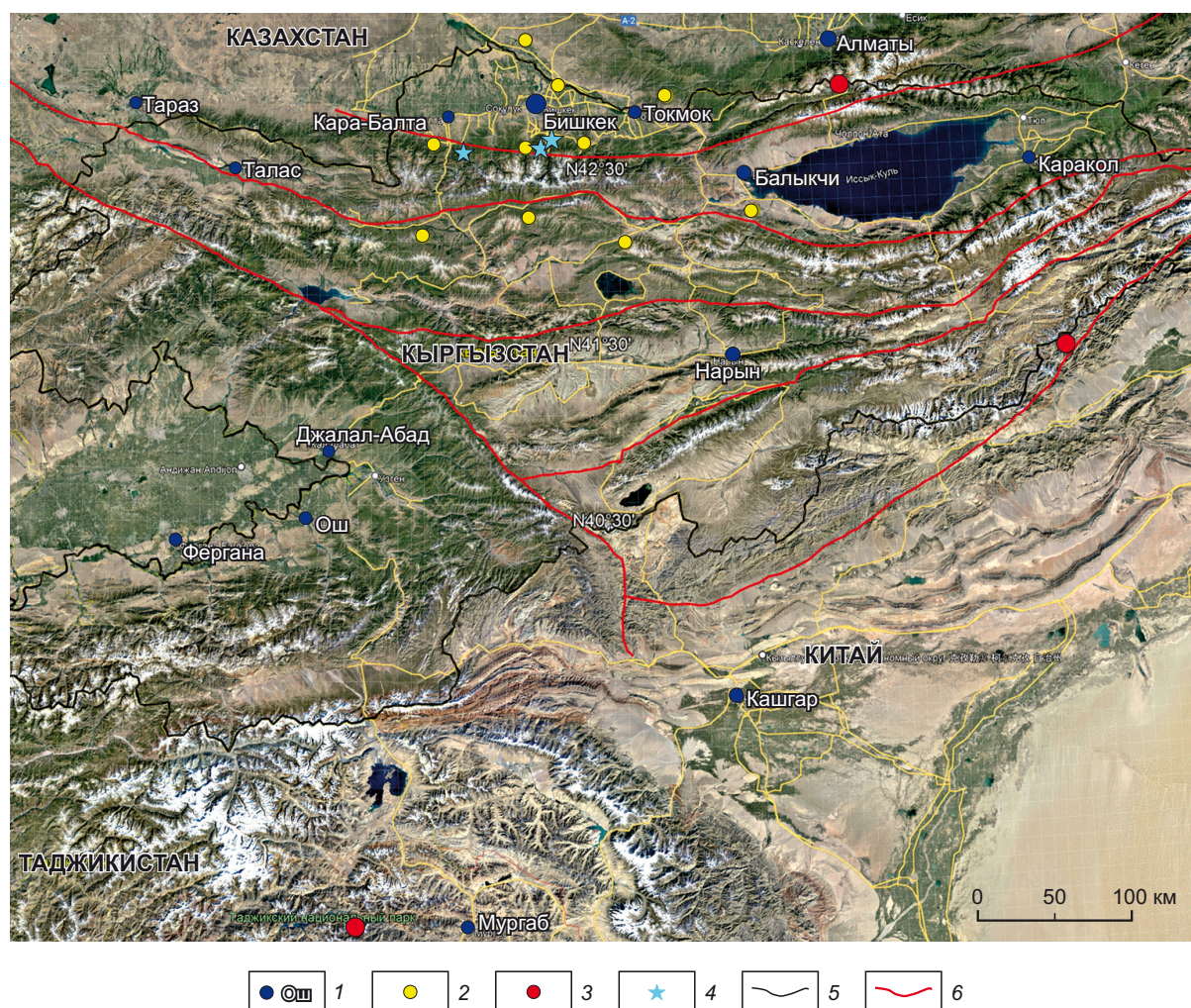


Рис. 1. Карта-схема исследования мощных сейсмических событий, произошедших на территории Китая (Учтурфанское землетрясение, 22 января 2024 г., 18:09:05 UTC, $m_b=7.3$), землетрясение на территории национального парка Таджикистана (Таджикистан, 23 февраля 2023 г. 00:37:38 UTC, $m_b=7.1$), а также землетрясение на границе Кыргызстана и Казахстана (40 км к югу от Алматы, 4 марта 2024 г. 06:22:04.4 UTC, $m_b=5.4$).

1 – основные населенные пункты; 2 – сейсмические станции сети KNET; 3 – исследуемые сейсмические события; 4 – с запада на восток – стационарные Аксу, Чон-Курчак и Научная станция РАН в Бишкеке; 5 – граница Кыргызстана; 6 – региональные разломные зоны.

Fig. 1. Map-scheme of the study of powerful seismic events which have happened on the territory of China (Uqturpan earthquake, January 22, 2024, 18:09:05 UTC, $m_b=7.3$), the earthquake on the territory of the national park of Tajikistan (Tajikistan, February 23, 2023, 00:37:38 UTC, $m_b=7.3$) and also the earthquake at the border of Kyrgyzstan and Kazakhstan (40 km to the south from Almaty, March 4, 2024, 06:22:04.4, $m_s=5.4$).

1 – main settlements; 2 – seismic stations of KNET network; 3 – seismic events under study; 4 – from west to east – stationary monitoring points Aksu, Chon-Kurchak and Research Station RAS in Bishkek; 5 – border of Kyrgyzstan; 6 – regional fault zones.

Азии и Китая. Отклик от землетрясения 4 марта 2024 г. был зарегистрирован на обоих МТ пунктах в Чуйской впадине (Северный Тянь-Шань) – на всех пяти компонентах электромагнитного поля, несмотря на то, что землетрясение было слабым. Жители Бишкека его практически не почувствовали, хотя оно произошло примерно в 190 км от столицы.

6 февраля 2023 г. на юго-востоке Турции произошло два мощных землетрясения с магнитудой 7.8 (± 0.1) и 7.5 (± 0.1), после которых было зарегистрировано несколько тысяч афтершоков с магнитудой самого сильного из них до 6.7.

3. ПРОЯВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В КОМПОНЕНТАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В качестве примера существующей взаимосвязи между вариациями геофизических полей и сейсмичностью в настоящей работе авторами рассматривались записи пяти компонент электромагнитного поля Земли – двух горизонтальных компонент теллурического (E_x , E_y) поля, двух горизонтальных (H_x , H_y) и одной вертикальной (H_z) компоненты геомагнитного поля магнитотеллурической станции MTU-5 (производство канадской компании Phoenix Geophysics). Ниже на рисунках будут показаны окна записи с МТ стационаров

в программе EPI-KIT компании ООО «Северо-Запад», где по оси X отложено время наблюдения в минутах, по оси Y – амплитуды для каждой из пяти компонент электромагнитного поля в милливольтках. Наилучшим образом представлены записи, полученные на МТ стационаре Аксу в период землетрясений: 23 февраля 2023 г. (Таджикистан) (рис. 2, 3), 22 января 2024 г. (Китай) (рис. 3, 4, 5, 6, 7, 8), 4 марта 2024 г. 06:22:04.4 UTC mb=5.4 (граница Кыргызстан – Казахстан, Чолпон-Ата, рис. 9, 10, 11) и разрушительных землетрясений 6 февраля 2023 г. (Турция) (в 01:17:34 UTC, 37.226° с.ш.,

37.014° в.д., Mw=7.8 балла и в 10:24:48 UTC, 38.011° с.ш., 37.196° в.д., Mw=7.5) (рис. 12, 13).

Отклик от землетрясения 23 февраля 2023 г. был зарегистрирован на МТ пунктах. На рис. 3 показаны результаты регистрации электромагнитного поля. Очевидно, что отклик от сейсмического события наблюдается на всех пяти компонентах электромагнитного поля, несмотря на то, что землетрясение произошло примерно в тысяче километров от пункта регистрации. Максимальная амплитуда вариаций регистрируемых компонент наблюдается для $E_x=0.33$ мВ, $E_y=0.028$ мВ,

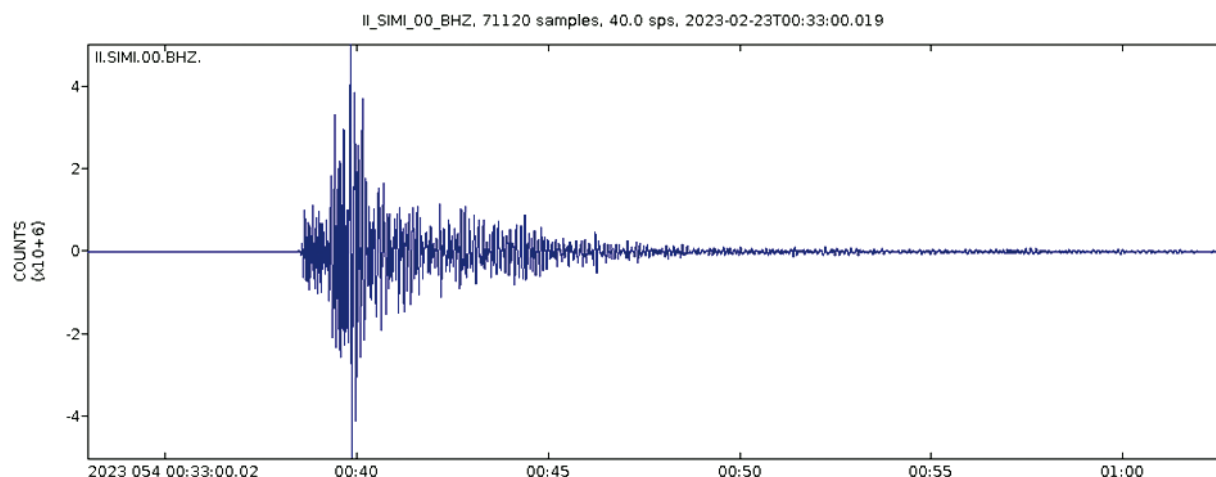


Рис. 2. Регистрация отклика от землетрясения 23 февраля 2023 г. (Таджикистан) сейсмостанцией Ала-Арча.

Fig. 2. Registration of response from the earthquake on February 23, 2023 (Tajikistan) by Ala-Archa seismic station.

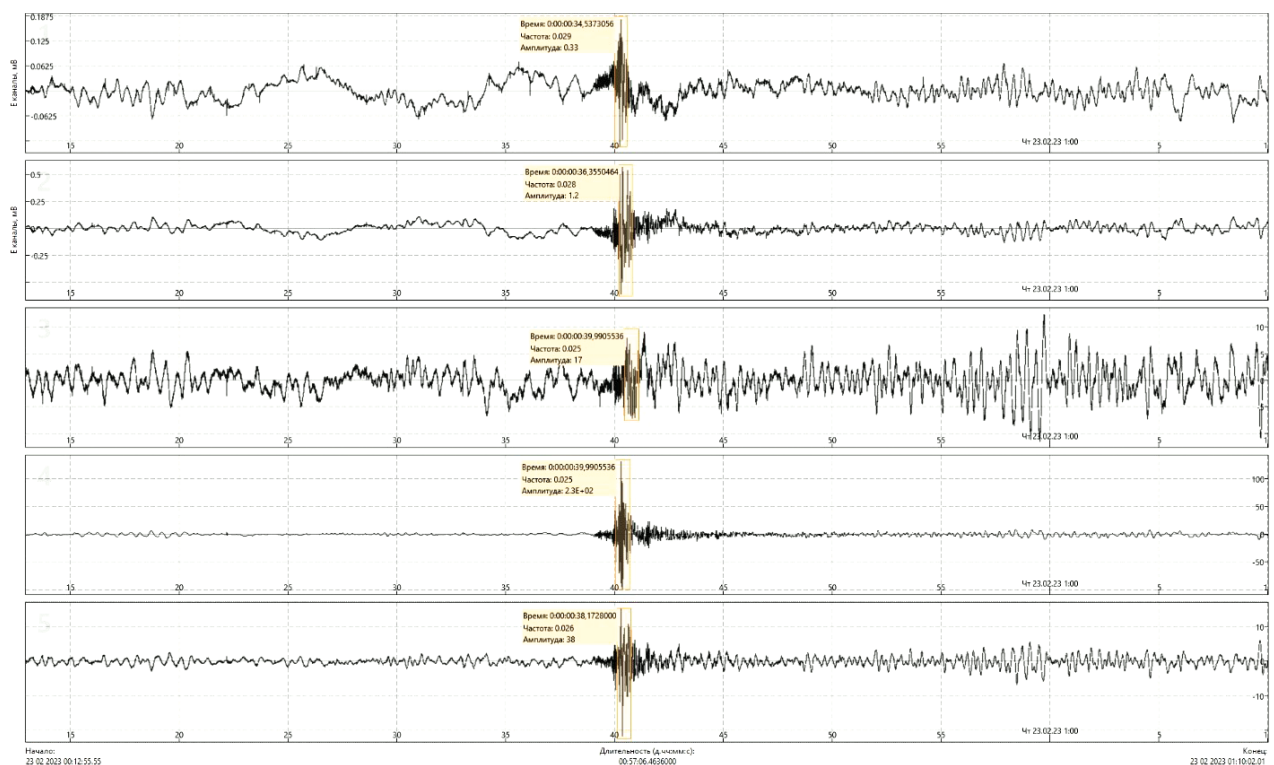


Рис. 3. Регистрация отклика от землетрясения 23 февраля 2023 г. (Таджикистан) на МТ стационарном пункте Аксу.

Fig. 3. Registration of response from the earthquake on February 23, 2023 (Tajikistan) на МТ стационарном пункте Аксу.

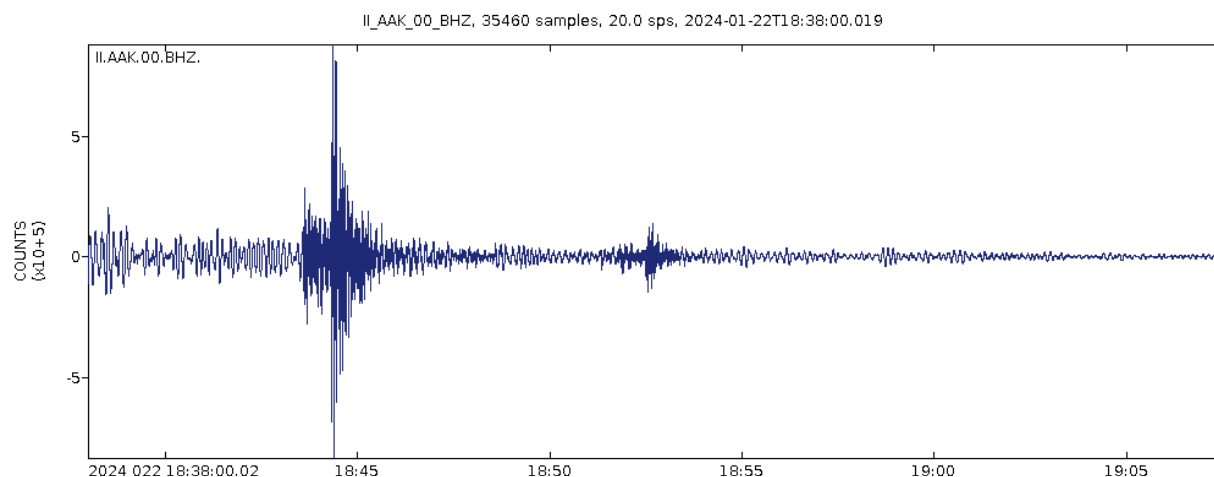


Рис. 4. Регистрация отклика от землетрясения 22 января 2024 г. (Северный Китай) сейсмостанцией Ала-Арча.

Fig. 4. Registration of response from the earthquake on January 22, 2024 (Northern China) by Ala-Archa seismic station.

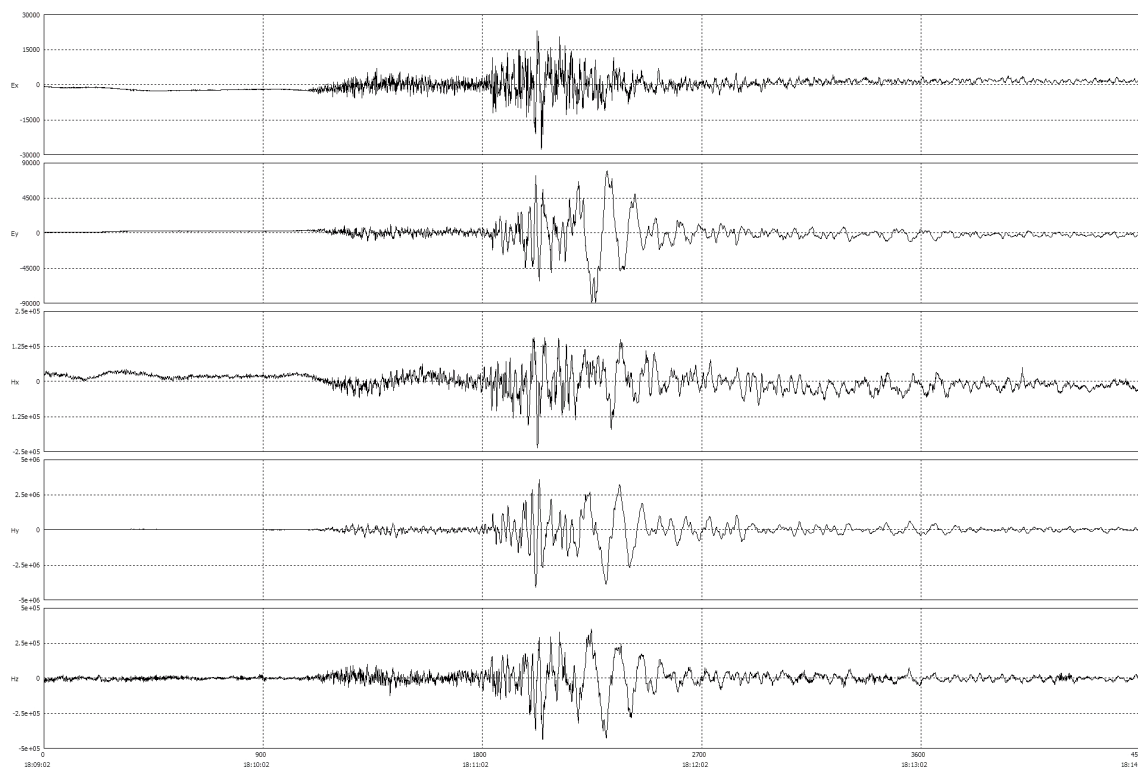


Рис. 5. Регистрация отклика от землетрясения 22 января 2024 г. (Северный Китай) на стационарном МТ пункте Чон-Курчак.

Fig. 5. Registration of response from the earthquake on January 22, 2024 (Northern China) at Chon-Kurchak MT stationary monitoring point.

$H_x=17$ мВ, $H_y=230$ мВ, $H_z=38$ мВ. Длительность вариации в большей степени проявилась на горизонтальных компонентах магнитного поля.

Ниже показаны результаты регистрации отклика от землетрясения 22 января 2024 г. (Северный Китай) сейсмостанцией Ала-Арча (см. рис. 4) и магнитотеллурической станцией MTU-5 Phoenix Geophysics (см. рис. 5).

Полученные данные свидетельствуют о ярко выраженных вариациях в период землетрясения пяти ком-

понент геомагнитного поля. Максимальная амплитуда вариаций регистрируемых компонент наблюдается для $E_x=0.45$ мВ, $E_y=0.34$ мВ, $H_x=450$ мВ, $H_y=150$ мВ, $H_z=530$ мВ, длительность вариации в большей степени проявилась на горизонтальных компонентах магнитного поля. Помимо основного толчка были зарегистрированы афтершоки, например сейсмический отклик – на станции НЯЦ РК Подгорное (см. рис. 6), электромагнитный – на МТ стационаре Чон-Курчак (см. рис. 7) и Аксу (см. рис. 8).

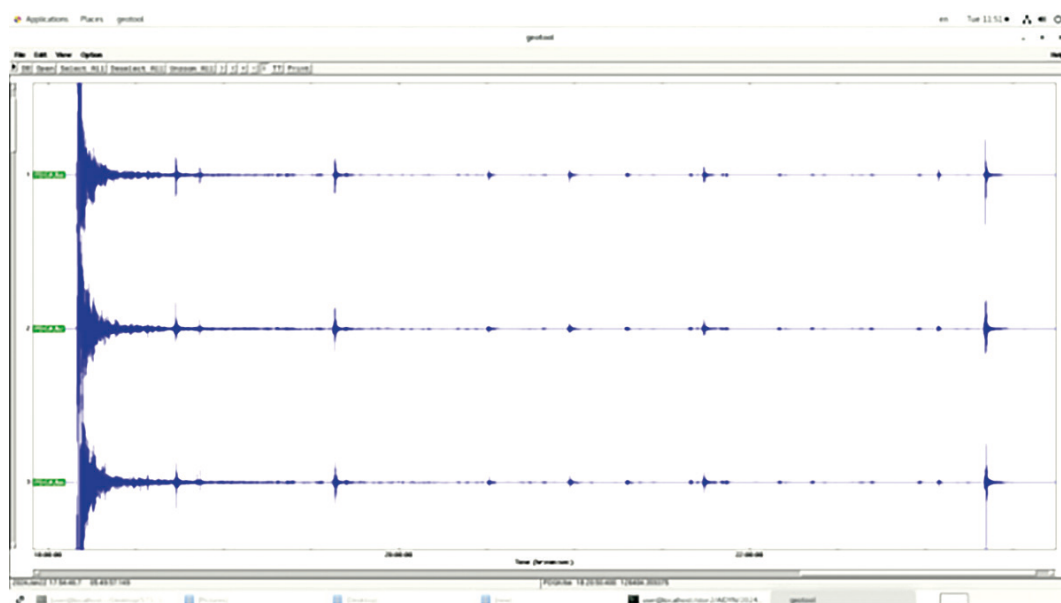


Рис. 6. Записи афтершоков и главного толчка Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 г. на сеймостанции НЯЦ РК Подгорное.

Fig. 6. Records of aftershocks and main shock of the Uqturpan earthquake which occurred on January 22, 2024 at NNC RK Podgornoye seismic station.

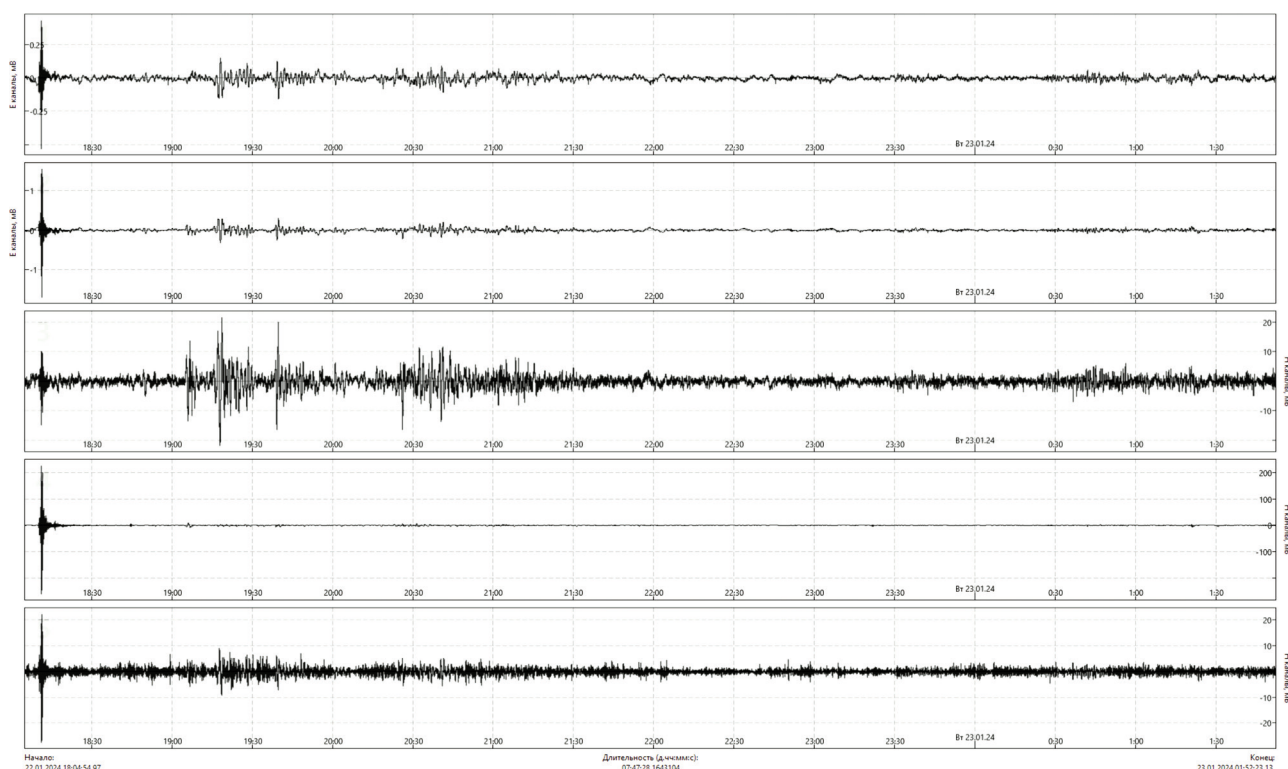


Рис. 7. Регистрация отклика от Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 г. и его афтершоков на МТ стационарном пункте Чон-Курчак.

Fig. 7. Registration of response from Uqturpan earthquake on January 22, 2024 and its aftershocks at Chon-Kurchak MT stationary monitoring point.

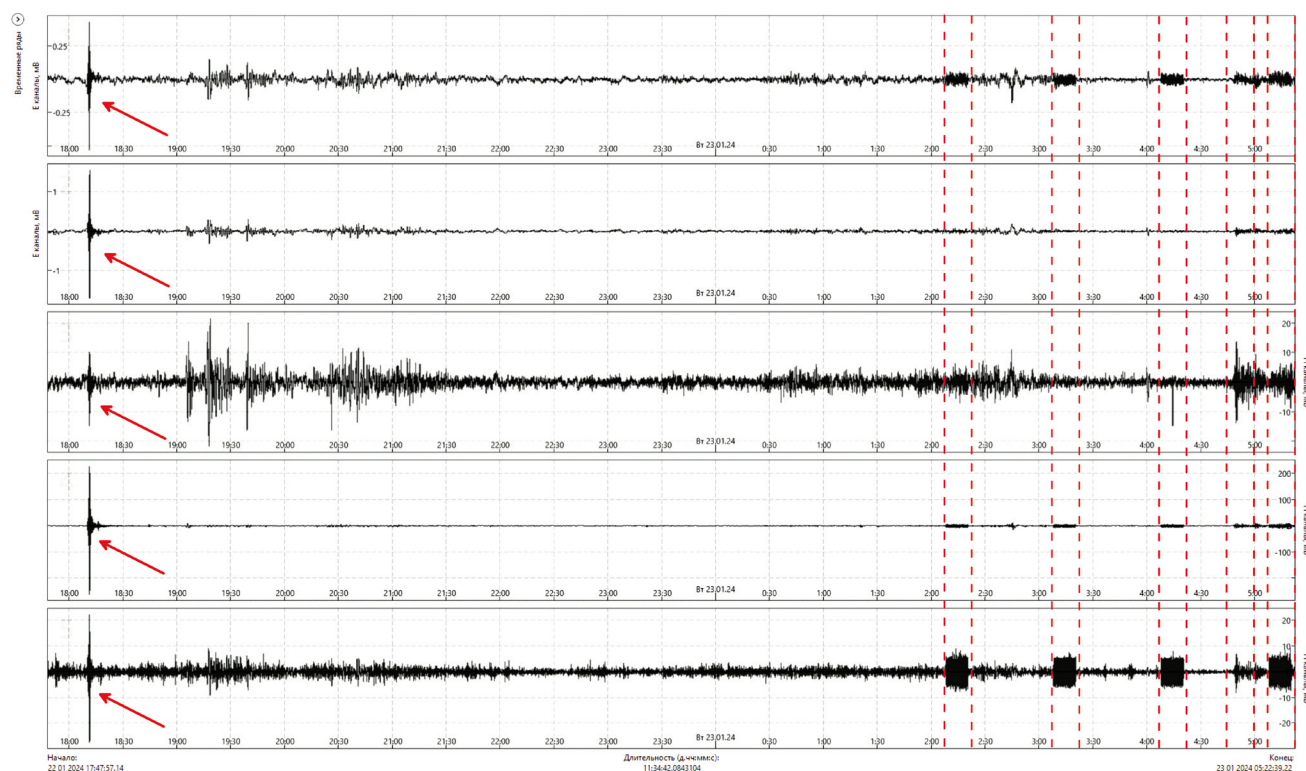


Рис. 8. Проявление афтершоков Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 г. в компонентах естественного электромагнитного поля Земли на МТ стационарном пункте Аксу.

Fig. 8. Manifestation of aftershocks of the Uqturpan earthquake on January 22, 2024 in components of natural electromagnetic field of the Earth at Aksu MT stationary monitoring point.

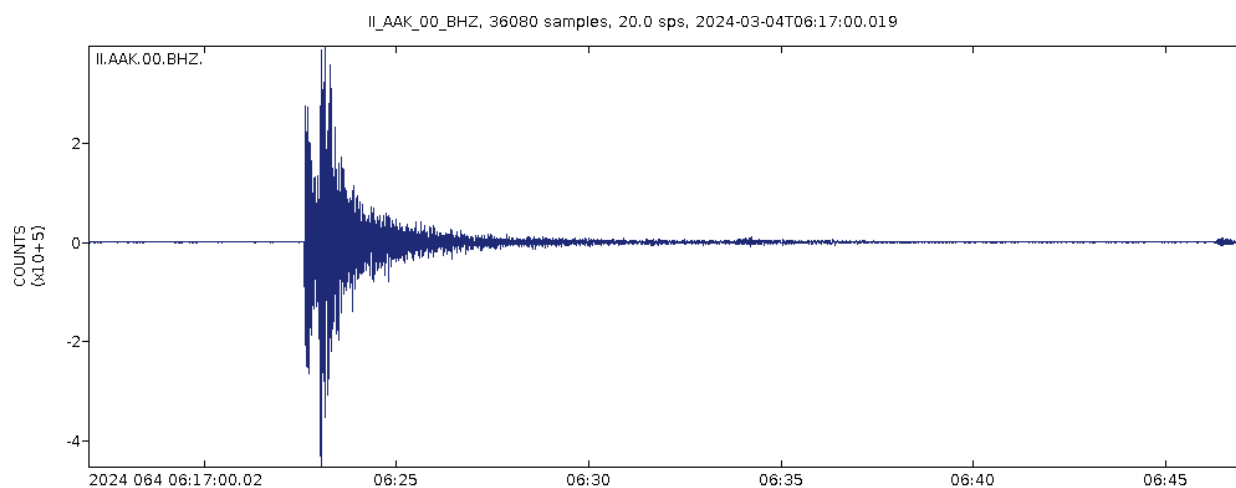


Рис. 9. Регистрация землетрясения 4 марта 2024 г. 06:22:04.4 (граница Кыргызстан – Казахстан, $m_b=5.4$) сейсмостанцией Ала-Арча.

Fig. 9. Registration of the earthquake on March 4, 2024, 06:22:04.4 (Kyrgyzstan – Kazakhstan border, $m_b=5.4$) by Ala-Archa seismic station.

Регистрация землетрясения 4 марта 2024 г. (граница Кыргызстан – Казахстан, 06:22:04.4, $m_b=5.4$) сейсмостанцией Ала-Арча показана на рис. 9. Особый интерес представляют вариации на мониторинговых пунктах, расположенных на разных расстояниях от очага землетрясения, например стационарах магнитотеллурического мониторинга Чон-Курчак и Аксу (Чуйская впа-

дина, Северный Тянь-Шань) (см. рис. 10, 11). Что касается природы наблюдаемых вариаций, то они могут быть связаны с механоэлектрическими процессами, возникающими на крайней стадии подготовки очага землетрясения и в процессе реализации сейсмического события. Перед сильными землетрясениями наблюдаются деформации и растрескивание горных пород,

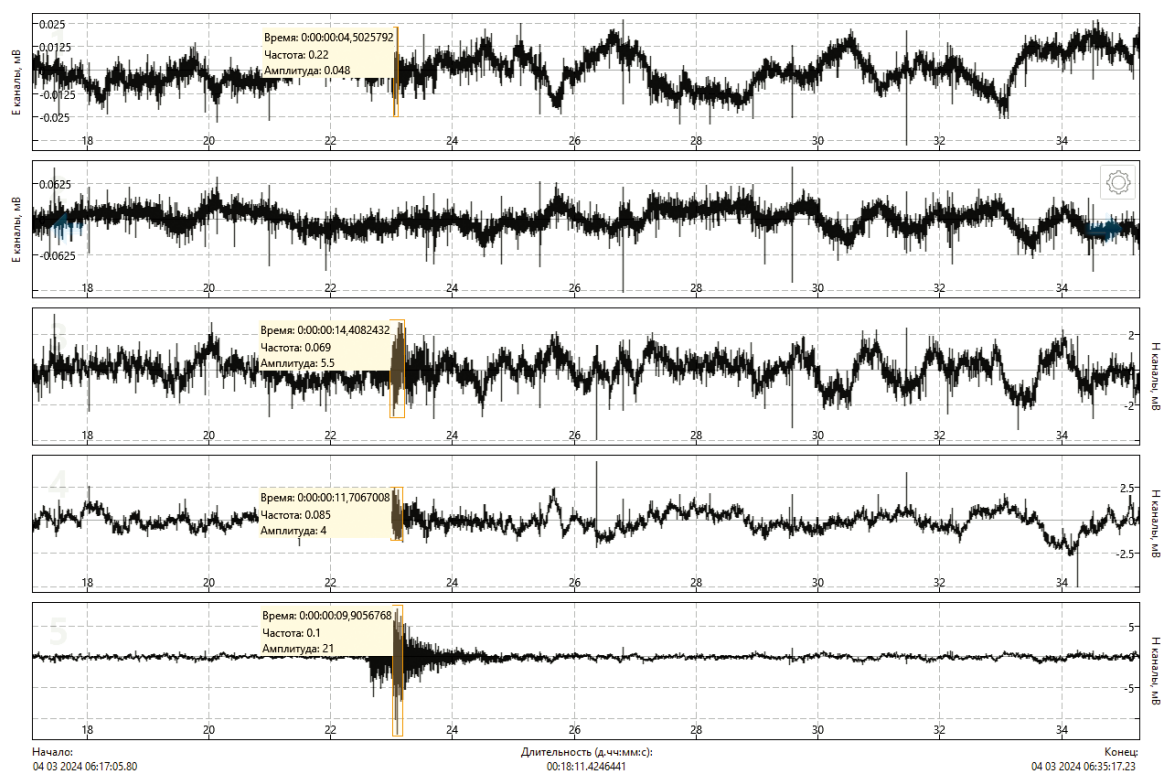


Рис. 10. Регистрация землетрясения 4 марта 2024 г. 06:22:04.4 на границе Кыргызстан – Казахстан на МТ стационарном пункте Чон-Курчак.

Fig. 10. Registration of the earthquake on March 4, 2024, 06:22:04.4 at Kyrgyzstan – Kazakhstan border at Chon-Kurchak MT stationary monitoring point.

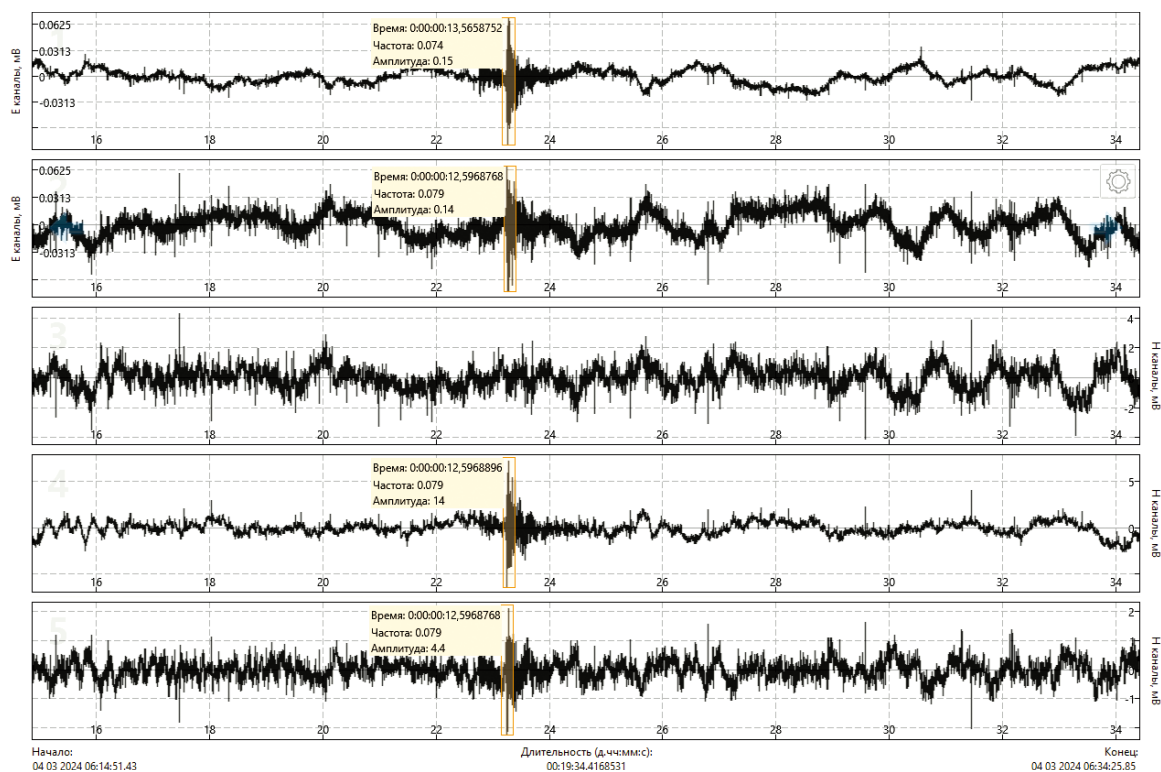


Рис. 11. Регистрация землетрясения 4 марта 2024 г. 06:22:04.4 на границе Кыргызстан – Казахстан на МТ стационарном пункте Аксу.

Fig. 11. Registration of the earthquake on March 4, 2024, 06:22:04.4 at Kyrgyzstan – Kazakhstan border at Aksu MT stationary monitoring point.

а следовательно, и изменение их напряженно-деформированного состояния, резкое изменение интенсивности эманаций газов, уровня грунтовых вод и многое другое, что приводит к изменению физических параметров геологической среды, например электропроводности, токовых систем, и в конечном результате – к возмущению электромагнитного поля Земли, компоненты которого регистрируются авторами.

Результаты мониторинга на рис. 10 и 11 свидетельствуют о ярко выраженных вариациях в период землетрясения для четырех компонент электромагнитного поля: для стационара Чон-Курчак – горизонтальной компоненты теллурического (E_x), двух горизонтальных (H_x , H_y) и вертикальной (H_z) компоненты геомагнитного поля. Аномального поведения для теллурической E_y не наблюдается. Максимальная амплитуда вариаций регистрируемых компонент наблюдается для $E_x=0.049$ мВ, $H_x=5.5$ мВ, $H_y=4.1$ мВ, $H_z=20$ мВ, длительность вариации в большей степени проявилась на горизонтальных компонентах магнитного поля.

Для стационара Аксу ярко выражены вариации двух горизонтальных компонент теллурического (E_x , E_y), горизонтальной (H_y) и вертикальной (H_z) компонент геомагнитного поля. Аномального поведения для теллурической E_y не наблюдается. Максимальная амплитуда вариаций регистрируемых компонент наблюдается для $E_x=0.16$ мВ, $E_y=0.15$ мВ, $H_y=14$ мВ, $H_z=4.4$ мВ, длительность вариации в большей степени проявилась на горизонтальных компонентах магнитного поля. Различия в поведении вариаций на МТ мониторинговых пунктах Чон-Курчак и Аксу можно объяснить особенностями геологического и геоэлектрического строения разреза в месте расположения станций.

На юго-востоке Турции произошло два мощнейших землетрясения (в 01:17:34 UTC, 37.226° с.ш., 37.014° в.д., $M_w=7.8$, и в 10:24:48 UTC, 38.011° с.ш., 37.196° в.д., $M_w=7.5$),

расстояние от эпицентров которых до пунктов магнитотеллурического мониторинга Северного Тянь-Шаня составляет около 4000 км. Район, в котором произошли землетрясения, находится на пересечении трех тектонических плит: Анатолийской, Аравийской и Африканской, и было бы очень интересно посмотреть отражение этого сейсмического события (рис. 12) в компонентах электромагнитного поля, зарегистрированных магнитотеллурической станцией (рис. 13). Однако в записи, представленной на рис. 13, вышеуказанные землетрясения не проявились, в отличие от землетрясений, которые произошли за время регистрации электромагнитного поля в радиусе 500 км.

Стоит отметить, что все косейсмические электромагнитные возмущения, которые наблюдаются авторами, как правило, регистрируются после основного толчка с небольшой задержкой. Частота следования всплесков резко возрастает во время землетрясений и постепенно уменьшается после них.

На рис. 14 показано объемное распределение энергетических характеристик для стационарного пункта мониторинга Аксу. «Под энергетической характеристикой электромагнитного поля эндогенного происхождения будем понимать следующий интеграл по частоте от значения, полученного после преобразования Фурье зарегистрированных сигналов во временной области в течение одного часа» [Batalev et al., 2019, с. 46]. Очевидно, что Учтурфанское землетрясение 22 января 2024 г. (Северный Китай) проявилось в виде аномалии.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

При интерпретации полученных результатов необходимо четкое понимание различных физических механизмов электромагнитного отклика геологической среды на сейсмические события. Очевидно, что

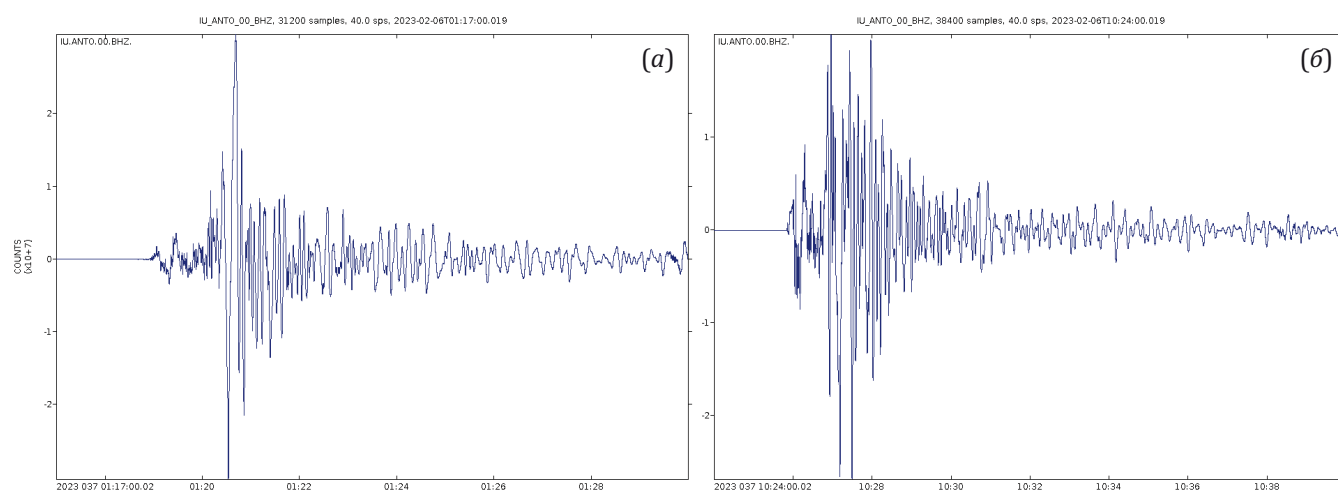


Рис. 12. Разрушительные землетрясения (Турция, 6 февраля 2023 г). Сейсмограммы: (а) – землетрясение в Газиантепе (01:17:34 UTC, 37.226° с.ш., 37.014° в.д., $M_w=7.8$); (б) – землетрясение в Кахраманмараше (10:24:48 UTC, 38.011° с.ш., 37.196° в.д., $M_w=7.5$).

Fig. 12. Destructive earthquakes occurred in Turkey on 2023 February 6. Seismograms: (a) – Gaziantep earthquake (01:17:34 UTC, 37.226° N, 37.014° E, $M_w=7.8$; (b) – Kahramanmarash earthquake (10:24:48 UTC, 38.011° N 37.196° E, $M_w=7.5$).

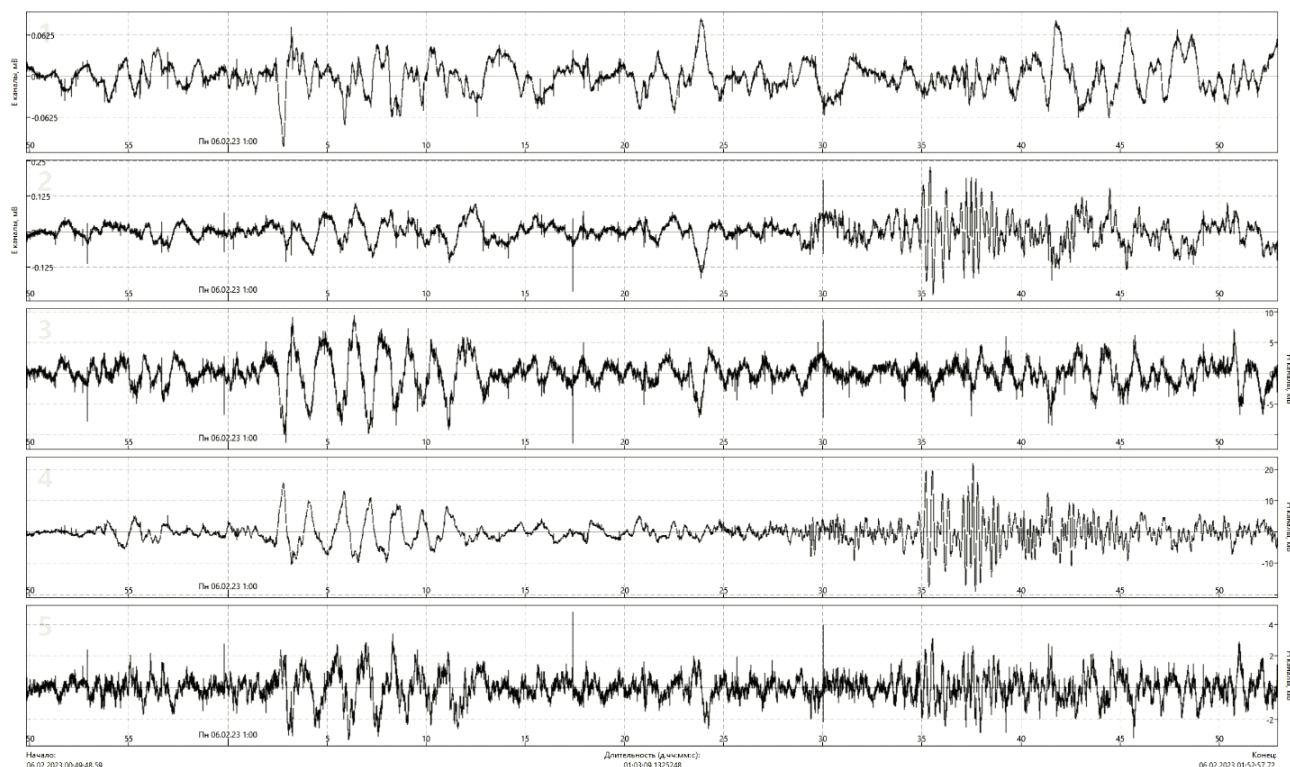


Рис. 13. Разрушительное землетрясение в Турции (6 февраля 2023 г., 01:17:34 UTC, $m_b=8$). Запись на MT стационаре Аксу во временном окне 00:49:49 – 01:52:58 UTC.

Fig. 13. Destructive earthquake happened in Turkey (February 6, 2023, 01:17:34 UTC, $m_b=8$). Recording on Aksu MT stationary monitoring point in the time window 00:49:49–01:52:58 UTC.

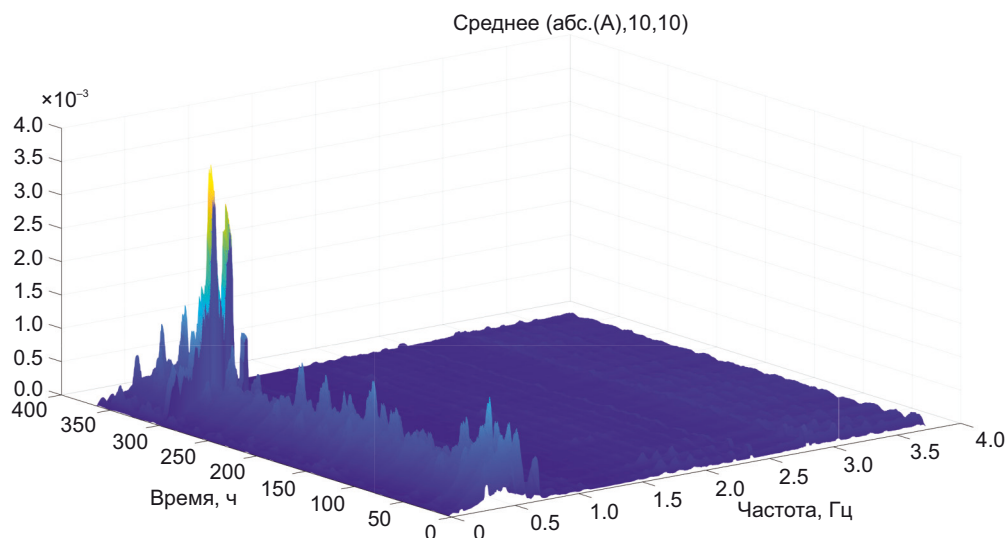


Рис. 14. Объемное представление энергетических характеристик стационарного пункта MT мониторинга Аксу (январь 2024 г.).

Fig. 14. Volumetric representation of energy characteristics of the Aksu stationary MT monitoring point (January 2024).

существует как минимум два физических механизма, с помощью которых можно объяснить аномалии в регистрируемых сигналах электромагнитного поля: 1) сейсмоэлектрический эффект, который обусловлен электрокинетическим воздействием в пористых водонасыщенных средах, возникающим при прохождении сейсмических волн; 2) генерация токов в слоях земной

коры с повышенной электропроводностью во время их движения в сейсмической волне. В первом случае аномалии регистрируемых компонент связаны с электрокинетическими токами, которые возникают благодаря увеличению концентрации ионов в поровой жидкости при прохождении через нее сейсмической волны. На основе изучения результатов проявления

сейсмoeлектрического эффекта для различных тензочувствительных пунктов наблюдения можно сделать выводы о распределении физических свойств горных пород в разрезе. Во втором случае в геологической среде возникают токи проводимости (сторонние токи), распространение которых описывается уравнениями диффузионного типа [Surkov, 2000]. Эти механизмы также позволяют объяснить косейсмический эффект, проявляющийся с небольшой задержкой по отношению к сейсмическим колебаниям.

Еще одним эффектом, заслуживающим внимания, является сейсмоионосферный, который проявляется в возникновении перемещающихся ионосферных возмущений и, как следствие, в связанных с ними вариациях электромагнитного поля Земли перед землетрясениями, которые проявляются от нескольких дней до нескольких часов перед сильными землетрясениями. Такие возмущения можно рассматривать как возможные предвестники сейсмических событий.

Анализ полученных данных указывает на различия в поведении вариаций на МТ мониторинговых пунктах, расположенных в Чуйской впадине (Аксу 42.60911° с.ш., 74.00833° в.д.; Чон-Курчак 42.62828° с.ш., 74.60671° в.д., Северный Тянь-Шань), на территории Бишкекского геодинамического полигона (см. рис. 10, 11).

Это может быть обусловлено:

- 1) расположением мониторингового пункта относительно источника деформационного процесса;
- 2) особенностями геологического и геоэлектрического строения разреза в месте расположения станций;
- 3) отличием физических свойств геологической среды, в первую очередь электрических и магнитных свойств горных пород, характерных для пункта наблюдения;
- 4) присутствием в районе расположения мониторинговых станций токовых систем различной природы, не связанных с геодинамическими процессами.

Процессы, связанные с разрушением и деформацией вещества, а также сопутствующие им электродинамические процессы, связанные с механизмами генерации электромагнитного поля при естественных процессах в земной коре и характерные для землетрясений, наиболее ярко проявляются в зоне разломов, где и расположены пункты магнитотеллурического мониторинга.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о выраженных изменениях во время сильных землетрясений (23 февраля 2023 г. (Таджикистан), 22.01.2024 г. (Китай)) пяти компонент электромагнитного поля – двух горизонтальных теллурических компонент (E_x , E_y) и двух горизонтальных (H_x , H_y) и вертикальной (H_z) компонент геомагнитного поля. Наиболее ярко проявилось Учтурфанское событие (22.01.2024 г., Китай), но оно находится ближе землетрясения 23.02.2023 г. и является более сильным. Событие 04.03.2024 г. 06:22:04.4 UTC

(граница Кыргызстан – Казахстан, Чолпон-Ата) – самое слабое и близкое – отчетливо проявилось в четырех компонентах электромагнитного поля. Разрушительные землетрясения 06.02.2023 г. в Турции (в 01:17:34 UTC, 37.226° с.ш., 37.014° в.д. – 7.8 балла и в 10:24:48 UTC, 38.011° с.ш., 37.196° в.д. – 7.5 балла) станциями магнитотеллурического мониторинга не зарегистрированы ввиду их очень большой удаленности.

Стоит отметить, что наблюдаемые авторами электромагнитные возмущения обычно регистрируются после главного толчка с небольшой задержкой (3–9 с), иногда до первых минут. Частота всплесков резко возрастает во время землетрясений и постепенно снижается после них. Особый интерес представляет рассмотрение вариаций в точках мониторинга, расположенных на разном расстоянии от очага землетрясения, например на станциях МТ мониторинга Чон-Курчак и Аксу (Чуйская впадина, Северный Тянь-Шань).

Экспериментальные результаты показывают, что параметры сигналов электромагнитного поля могут существенно отличаться даже на небольшой удаленности друг от друга (~60 км) в том случае, когда пункты наблюдения расположены в разных геологических условиях (с различными физико-механическими свойствами и структурой).

На основе анализа данных сейсмического и МТ мониторинга (территория Северного Тянь-Шаня) и выявления их возможной связи с геодинамикой и сейсмическим режимом региона, а также совершенствования геофизических методов мониторинга геодинамических процессов установлена связь произошедших землетрясений, их удаленности, энергетического класса и положения относительно пункта мониторинга с вариациями компонент регистрируемого электромагнитного поля.

Что касается характера наблюдаемых изменений, то они могут быть связаны с механоэлектрическими процессами, возникающими на экстремальной стадии подготовки очага землетрясения и в ходе реализации сейсмического события. Перед сильными землетрясениями наблюдаются деформации и растрескивание горных пород, а следовательно, и изменение их напряженно-деформированного состояния, резкое изменение интенсивности газовых выделений, уровня грунтовых вод и многое другое, что приводит к изменению физических параметров геологической среды, например электропроводности, изменению в системах тока и, как следствие, возмущению электромагнитного поля Земли, компоненты которого регистрируются авторами.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abdrakhmatov K.Ye., Aldazhanov S.A., Hager B.H., Hamburger M.W., Herring T.A., Kalabaev K.B., Makarov V.I., Molnar P. et al., 1996. Relatively Recent Construction of the Tien Shan Inferred from GPS Measurements of Present-Day Crustal Deformation Rates. *Nature* 384, 450–453. <https://doi.org/10.1038/384450a0>.

Barsukov O.M., Sorokin O.N., 1973. Change in the Apparent Resistance of Rocks in the Garm Seismically Active Region. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth* 10, 100–102 (in Russian) [Барсуков О.М., Сорокин О.Н. Изменение кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном районе // Известия АН СССР. Физика Земли. 1973. № 10. С. 100–102].

Batalev V.Y., Bataleva E.A., Matyukov V.E., Rybin A.K., 2019. 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* 42 (2), 42–56 (in Russian) [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. Серия: Науки о Земле. 2019. Вып. 42. № 2. С. 42–56.]. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56>.

Batalev V.Yu., Volykhin A.M., Rybin A.K., Trapeznikov Yu.A., Finyakin V.V., 1993. The Structure of the Crust in the Eastern Part of the Kyrgyz Tien Shan According to MTS and GMTS Data. In: *Manifestation of Geodynamic Processes in Geophysical Fields*. Nauka, Moscow, p. 96–112 (in Russian) [Баталев В.Ю., Волыхин А.М., Рыбин А.К., Трапезников Ю.А., Финякин В.В. Строение земной коры восточной части Киргизского Тянь-Шаня по данным МТЗ и ГМТЗ // Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. М.: Наука, 1993. С. 96–112].

Bataleva E., Nepeina K., 2020. On the Relationship of the Extrema of Lunar-Solar Tidal Influences and Seismic Events. *E3S Web of Conferences* 196, 02022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019602022>.

Bataleva E., Rybin A., Matyukov V., 2019. System for Collecting, Processing, Visualization, and Storage of the MT-Monitoring Data. *Data* 4 (3), 99. <https://doi.org/10.3390/data4030099>.

Bataleva E.A., 2016. Correlation Dependences of Electromagnetic and Deformation Parameters. *Doklady Earth Sciences* 468, 523–526. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16050184>.

Bataleva E.A., 2021. Modern Problems and Prospects for the Development of Magnetotelluric Monitoring on the Territory of the Bishkek Geodynamic Test Site. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 867, 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012002>.

Bataleva E.A., 2022. The Results of Monitoring the Zones of Dynamic Influence of the Fault Structures of the Northern Tien Shan. In: *Interexpo GEO-Siberia. Collection of Materials of the XVIII International Scientific Congress*. Vol. 2. Iss. 2. P. 332–339 (in Russian) [Баталева Е.А. Результаты мониторинга зон динамического влияния разломных структур Северного Тянь-Шаня // Интерэкспо Гео-Сибирь: Сборник материалов XVII международного научного конгресса. 2022. Т. 2. № 2. С. 332–339]. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-2-2-332-339>.

Bataleva E.A., Batalev V.Y., Rybin A.K., 2013. On the Question of the Interrelation Between Variations in Crustal Electrical Conductivity and Geodynamical Processes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 49 (3), 402–410. <https://doi.org/10.1134/S1069351313030038>.

Bataleva E.A., Mukhamadeeva V.A., 2018. Complex Electromagnetic Monitoring of Geodynamic Processes in the Northern Tien Shan (Bishkek Geodynamic Test Area). *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (2), 461–487 (in Russian) [Баталева Е.А., Мухамадеева В.А., Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 2. С. 461–487]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0356>.

Bataleva E.A., Przhivalgovskii E.S., Batalev V.Yu., Lavrushina E.V., Leonov M.G., Matyukov V.E., Rybin A.K., 2017. New Data on the Deep Structure of the South Kochkor Zone of Concentrated Deformation. *Doklady Earth Sciences* 475, 930–934. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1708013X>.

Bataleva E.A., Rybin A.K., Batalev V.Y., 2014. Variations of Rocks Apparent Resistivity as an Indicator of Stress-Deformed State of the Medium. *Geophysical Research* 15 (4), 53–64 (in Russian) [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. 53–64].

Bragin V.D., Batalev V.Yu., Zubovich A.V., Rybin A.K., Shchelochkov G.G., 2001. About Qualitative Relations of Modern Moves with an Abyssal Geoelectric Structure of Earth Crust of Central Tien Shan and a Distribution of Seismicity. *Journal of Asian Earth Sciences* 19 (3A), 7.

Bragin V.D., Mukhamadeeva V.A., 2009. Study of Variations in the Anisotropy of Electrical Resistance in the Crust at the Bishkek Geodynamic Test Area. In: *Geodynamics of Intracontinental Orogens and Geocological Problems. Materials of the Fourth International Symposium* (June 15–20, 2008). Iss. 4. Moscow–Bishkek, p. 74–84 (in Russian) [Брагин В.Д., Мухамадеева В.А. Изучение вариаций анизотропии электрического сопротивления в земной коре на территории Бишкекского геодинамического полигона // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геозоологические проблемы: Сборник материалов четвертого международного симпозиума (15–20 июня 2008 г.). Москва–Бишкек, 2009. № 4. С. 74–84].

Bragin V.D., Velikhov E.P., Volikhin A.M., Zeigarnik V.A., Koshkin N.A., Trapeznikov Y.A., Tchelochkov G.G., 1990.

Electro-Magnetic Studies in the Test-Field at Frunze. I. On the Relationship Between Resistivity Variations, Deformation Processes and Earthquakes. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 25 (3–4), 443–451.

Bragin V.D., Volykhin A.M., Trapeznikov Yu.A., 1992. Electrical Resistivity Variations and Moderate Earthquakes. *Tectonophysics* 202 (2–4), 233–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90107-H](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90107-H).

Gubatenko V.P., Ogadzhyanov V.A., Nazarov A.A., 2000. Monitoring the Rock Decompaction Dynamics by Electrical Prospecting Methods. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 36 (9), 799–805.

Guglielmi A.V., Zotov O.D., Zavyalov A.D., Klain B.I., 2022. On the Fundamental Laws of Earthquake Physics. *Journal of Volcanology and Seismology* 16, 143–149. <https://doi.org/10.1134/S0742046322020026>.

Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Rebet-sky Yu.L., 2023. The Probability of a Strong ($M \geq 6.0$) Earthquake in the South Fergana Seismic Activity Zone in the Coming Years. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (1), 0688 (in Russian) [Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А., Ребецкий Ю.Л. О возможности возникновения сильного (магнитуда $M \geq 6.0$) землетрясения в южно-ферганской сейсмоактивной зоне в ближайшие годы // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 1. 0688]. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-1-0688>.

Lutikov A.I., Dontsova G.Yu., Likhodeev D.V., Rogozhin E.A., 2021. The Strong March 25, 2020 Earthquake East of the Northern Kuril Islands. *Seismic Instruments* 57, 276–286. <https://doi.org/10.3103/S0747923921030099>.

Makarov V.I., Alekseev D.V., Leonov M.G., Batalev V.Y., Bataleva E.A., Bragin V.D., Rybin A.K., Shchelochkov G.G. et al., 2010. Underthrusting of Tarim Beneath the Tien Shan and Deep Structure of Their Junction Zone: Main Results of Seismic Experiment Along Manas Profile Kashgar-Song-Köl. *Geotectonics* 44, 102–126. <https://doi.org/10.1134/S0016852110020020>.

Nepeina K., Bataleva E., 2022. Evaluation of Hypocenters Distribution Based on the Geoelectric Models in the Tien Shan Earthquake-Prone Areas. In: A. Kostrov, N. Bobrov, E. Gordeev, E. Kulakov, E. Lyskova, I. Mironova (Eds), *Problems of Geocosmos-2020. Proceedings of the XIII Conference and School*. Springer, p. 309–316. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_22.

Nepeina K., Bataleva E., Alexandrov P., 2023. Electromagnetic Monitoring of Modern Geodynamic Processes: An Approach for Micro-Inhomogeneous Rock Through Effective Parameters. *Applied Sciences* 13 (14), 8063. <https://doi.org/10.3390/app13148063>.

Nevedrova N.N., Epov M.I., 2012. Electromagnetic Monitoring in Seismically Active Regions of Siberia. *Geophysical Journal* 34 (4), 209–223 (in Russian) [Неведрова Н.Н., Эпов М.И. Электромагнитный мониторинг в сейсмоактивных районах Сибири // Геофизический журнал. Т. 34. № 4. С. 209–223].

Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Shalaginov A.E., Babushkin S.M., 2019. Electromagnetic Monitoring in the Region of Seismic Activization (on the Gorny Altai (Russia) Example).

Geodesy and Geodynamics. 10 (6), 460–470, <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.06.001>.

Nigmatullin R.R., Bataleva E.A., Nepeina K.S., Matiukov V.E., 2023. Quality Control of the Initial Magnetotelluric Data: Analysis of Calibration Curves Using a Fitting Function Represented by the Ratio of 4th-Order Polynomials. *Measurement* 216, 112914. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112914>.

Novikov I.S., Emanov A.A., Leskova E.V., Batalev V.Yu., Rybin A.K., Bataleva E.A., 2008. The System of Neotectonic Faults in Southeastern Altai: Orientations and Geometry of Motion. *Russian Geology and Geophysics* 49 (11), 859–867. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.04.005>.

Przhiyalgovskii E.S., Lavrushina E.V., Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Leonov M.G., Rybin A.K., 2018. Structure of the Basement Surface and Sediments in the Kochkor Basin (Tien Shan): Geological and Geophysical Evidence. *Russian Geology and Geophysics* 59 (4), 335–350. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.09.003>.

Rybin A., Bataleva E., Nepeina K., 2023. Deep Structure and Dynamics of the Issyk-Ata Fault (Northern Tien Shan). In: A. Kostrov, E. Lyskova, I. Mironova, S. Apatenkov, S. Baranov (Eds), *Problems of Geocosmos-2022. Proceedings of the XIV Conference and School*. Springer, p. 213–226. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40728-4_15.

Rybin A., Bataleva E., Nepeina K., Matiukov V., Alexandrov P., Kaznacheev P., 2020. Response of Cracking Processes in Variations of Geophysical Fields. *Journal of Applied Geophysics* 181, 104144. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104144>.

Rybin A.K., 2011. Deep Structure and Recent Geodynamics of the Central Tien Shan by Magnetotelluric Research Results. *Nauchny Mir, Moscow*, 232 p. (in Russian) [Рыбин А.К. Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических исследований. М.: Научный мир, 2011. 232 с.].

Rybin A.K., Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Makarov V.I., Safronov I.V., 2005. Structure of the Earth Crust by Magnetotelluric Soundings. In: N.P. Laverov, V.I. Makarov (Eds), *Recent Geodynamics of Intracontinental Areas of Collision Mountain Building (Central Asia)*. Nauchny Mir, Moscow, p. 79–96 (in Russian) [Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Макаров В.И., Сафронов И.В. Структура земной коры по данным магнитотеллурических зондирований // Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Ред. Н.П. Лаверов, В.И. Макаров. М.: Научный мир, 2005. С. 79–96].

Rybin A.K., Leonov M.G., Przhiyalgovskii E.S., Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Bragin V.D., Morozov Yu.A., Shchelochkov G.G., 2016. Nature of Electric Conductive Layers of the Upper Crust and Infrastructure of Granites of the Central Tien Shan. *Doklady Earth Sciences* 470, 968–971. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16090142>.

Rybin A.K., Spichak V.V., Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Matyukov V.E., 2008. Array Magnetotelluric Soundings in the Active Seismic Area of Northern Tien Shan. *Russian Geology*

and Geophysics 49 (5), 337–349. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.09.014>.

Safronov I.V., Zeygarnik V.A., Shchelochkov G.G., Rybin A.K., Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Fox L., Ingerov A., Feldman I.S., 2004. Some Aspects of Continuous Magnetotelluric Observations in the North Tien Shan Seismogenerating Zone. In: Physical, Geophysical and Geodynamical Studies in Central Asia at the Beginning of the 21st Century. KRSU, Bishkek, p. 16–21 (in Russian) [Сафронов И.В., Зейгарник В.А., Щелочков Г.Г., Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Фокс Л., Ингеров А., Фельдман И.С. Некоторые аспекты непрерывных магнитотеллурических наблюдений в Северо-Тяньшаньской сейсмогенерирующей зоне // Физические, геофизические и геодинамические исследования в Центральной Азии в начале XXI века. Бишкек: КРСУ, 2004. С. 16–21].

Sass P., Ritter O., Ratschbacher L., Tympel J., Matiukov V.E., Rybin A.K., Batalev V.Yu., 2014. Resistivity Structure Underneath the Pamir and Southern Tian Shan. *Geophysical Journal International* 198 (1), 564–579. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu146>.

Shalaginov A.E., Nevedrova N.N., 2023. Electromagnetic Monitoring During the Aftershock Period of the 2003 Chuya Earthquake in the Mountain (Gorny) Altai: Measurement Methodology, Results. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (4), 0714 (in Russian) [Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н. Электромагнитный мониторинг в афтершоковый период чуйского землетрясения 2003 г. в Горном Алтае: методика измерений, результаты // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 4. 0714]. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-4-0714>.

Sidorin A.Ya., 1992. *Earthquake Precursors*. Nauka, Moscow, 190 p. (in Russian) [Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 190 с.].

Silva R., Franca G.S., Vilar C.S., Alcanis J.S., 2006. Nonextensive Models for Earthquakes. *Physical Review E* 73 (2), 026102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.026102>.

Sobolev G.A., Ponomarev A.V., 2003. *Physics of Earthquakes and Precursors*. Nauka, Moscow, 270 p. (in Russian) [Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.].

Stanica D., Stanica M., 2007. Electromagnetic Monitoring in Geodynamic Active Areas. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 4 (1), 99–107.

Surkov V.V., 2000. *Electromagnetic Effects of Explosions and Earthquakes*. MIFI, Moscow, 448 p. (in Russian) [Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ, 2000. 448 с.].

Telesca L., 2012. Maximum Likelihood Estimation of the Nonextensive Parameters of the Earthquake Cumula-

tive Magnitude Distribution. *Bulletin of the Seismological Society of America* 102 (2), 886–891. <https://doi.org/10.1785/0120110093>.

Thompson S.C., Weldon R.J., Rubin C.M., Abdrakhmatov K., Molnar P., Berger G.W., 2002. Late Quaternary Slip Rates Across the Central Tien Shan, Kyrgyzstan, Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107 (B9), 2203. <https://doi.org/10.1029/2001JB000596>.

Vladov V.L., Sudakova M.S., 2017. *GPR. From Physical Fundamentals to Promising Areas*. Textbook. GEOS, Moscow, 240 p. (in Russian) [Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: Учебное пособие. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.].

Volikhin A.M., Bragin V.D., Zubovich A.V., Koshkin N.A., Trapeznikov Yu.A., 1993. *The Manifestation of Geodynamic Processes in Geophysical Fields*. Nauka, Moscow, 158 p. (in Russian) [Волыхин А.М., Брагин В.Д., Zubovich А.В., Кошкин Н.А., Трапезников Ю.А. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. М.: Наука, 1993. 158 с.].

Zavyalov A.D., 2006. *Medium-Term Earthquake Forecast: Basics, Methodology, Implementation*. Nauka, Moscow, 242 p. (in Russian) [Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 242 с.].

Zavyalov A.D., Guglielmi A.V., Zotov O.D., 2020. Three Problems in Aftershock Physics. *Journal of Volcanology and Seismology* 14, 341–352. <https://doi.org/10.1134/S0742046320050073>.

Zhu F.C., Ai C.C., Liu B.X., Tian F.L., 2016. Study on Load/Unload Response Ratio of Brittle Rocks under Different Stress Paths. *Metal Mine* 45 (4), 52–57 (in Chinese).

Zilio D.L., Ampuero J.-P., 2023. Earthquake Doublet in Turkey and Syria. *Communications Earth & Environment* 4, 71. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00747-z>.

Zubovich A.V., Shchelochkov G.G., Mosienko O.I., Kuzikov S.I., Bragin V.D., Reigber C., Michajljow W., Wang X.-Q. et al., 2010. GPS Velocity Field for the Tien Shan and Surrounding Regions. *Tectonics* 29 (6), TC6014. <https://doi.org/10.1029/2010TC002772>.

Zubovich A.V., Trapeznikov Yu.A., Bragin B.D., Mosienko O.I., Shchelochkov G.G., Rybin A.K., Batalev V.Yu., 2001. Deformation Field, Deep Structure of the Crust, and Spatial Seismicity Distribution in the Tien Shan. *Russian Geology and Geophysics* 42 (10), 1634–1640 (in Russian) [Зубович А.В., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Мосиенко О.И., Щелочков Г.Г., Рыбин А.К., Баталев В.Ю. Поле деформаций, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1634–1640].