



ON THE GEOMAGNETIC FIELD VARIATIONS ASSOCIATED WITH AFTESHOCK-SEQUENCED EARTHQUAKES

V.A. Mukhamadeeva[✉], E.A. Lazareva

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

ABSTRACT. This article provides examples of aftershock sequences in the context of time series of the geomagnetic field variations ΔT for the 2003–2007 period when the Bishkek geodynamic polygon area experienced an increase in seismic activity. These examples are supplemented with an analysis of a series of the 2017 Kegety earthquakes accompanied by a large number of aftershocks; besides, an attempt has been made to analyze the impact of the January 22, 2024 Uqturpan earthquake, China, – the last major M7.0 event, – on the geomagnetic situation within the monitoring network. Changes in the stress-strain state of the geoenvironment associated with the generation and occurrence of earthquakes are recorded in the form of abnormal variations of the geomagnetic field due to the use of high-precision magnetovariation stations operating at the observation locations RS RAS. A relationship has been found between the ΔT variations and the impending earthquake by comparing the magnetometric data with the catalog data from the KNET seismological network. The stationary sites monitored ΔT variations during seismic events with different energy classes K and, if the earthquakes of energy class $K=6-8$ (weak) are visible on the ΔT graphs just sometimes against a continuous background, then the events with $K \geq 10$, especially those accompanied by a large number of aftershocks, are seen thereon as well-defined ΔT anomalies. It seems promising to conduct this kind of research for other earthquakes in order to study the influence of seismic events on variations of the geomagnetic field.

KEYWORDS: variation; geomagnetic field; time series; monitoring; earthquake; aftershock; class; fault

FUNDING: The study was carried out on the state assignment of the RS RAS (No. 1021052806454-2-1.5.1).



EDN: RBJKTL

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Vinera A. Mukhamadeeva, winny64@mail.ru

Received: August 31, 2024

Revised: December 12, 2024

Accepted: December 13, 2024

FOR CITATION: Mukhamadeeva V.A., Lazareva E.A., 2025. On the Geomagnetic Field Variations Associated with Aftershock-Sequenced Earthquakes. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (2), 0821. doi:10.5800/GT-2025-16-2-0821

О ВАРИАЦИЯХ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С АФТЕРШОКОВЫМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ

В.А. Мухамадеева, Е.А. Лазарева

Научная станция РАН, 720049, Бишкек, Кыргызстан

АННОТАЦИЯ. В статье приводятся примеры отражения афтершоковых последовательностей на временных рядах разности геомагнитного поля ΔT в период с 2003 по 2007 г., когда на территории Бишкекского геодинимического полигона наблюдалась повышенная сейсмическая активность. В дополнение к ним включен анализ серии Кегетинских землетрясений 2017 г., сопровождавшихся большим числом афтершоков, а также предпринята попытка анализа влияния Учтурфанского землетрясения, последнего крупного сейсмического события с магнитудой 7.0, произошедшего 22.01.2024 г. на территории Китая, на геомагнитную обстановку в пределах сети мониторинга. Изменения напряженно-деформированного состояния среды, связанные с подготовкой и реализацией землетрясений, фиксируются в виде аномальных вариаций геомагнитного поля благодаря использованию высокоточных магнитовариационных станций, работающих на пунктах наблюдения НС РАН. Установлена связь между вариациями ΔT и готовящимся землетрясением путем сопоставления данных магнитометрии с данными каталога, созданного на базе сейсмологической сети KNET. На стационарных пунктах сети мониторинга вариациями ΔT отмечаются сейсмические события разных энергетических классов K , и если слабые землетрясения 6–8-го класса присутствуют на графиках ΔT временами как постоянный фон, то события с $K \geq 10$, особенно те из них, которые сопровождаются большим числом афтершоков, фиксируются на графиках вполне заметными аномалиями ΔT . Представляется перспективным проведение такого рода исследований для других землетрясений с целью изучения влияния сейсмических событий на вариации геомагнитного поля.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вариация; геомагнитное поле; временной ряд; мониторинг; землетрясение; афтершок; класс; разлом

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

1. ВВЕДЕНИЕ

В комплекс геофизических исследований, проводимых Научной станцией РАН (НС РАН, г. Бишкек), наряду с электромагнитными зондированиями, сейсмологическими наблюдениями, входят и геомагнитные наблюдения с регистрацией модуля полного вектора T и использованием общепринятой разностной методики (вычисление разности модуля полного вектора магнитного поля ΔT относительно базовой станции Ак-Суу) при обработке и интерпретации данных [Report..., 1994]. Интерес к аномальным изменениям геомагнитного поля не случаен: на относительно небольших участках площади в определенном объеме пород земной коры в течение некоторого времени происходит накопление напряжений. Последующая разрядка в виде череды землетрясений с постепенным понижением их энергетического класса оказывается достаточно продолжительной по времени, и становится вполне вероятной их фиксация на графиках ΔT [Report..., 1994; Velikhov, Zeigarnik, 1993].

Как отмечалось в работе [Bataleva, Mukhamadeeva, 2018, с. 462], «основная задача прогностических полигонов, расположенных на территории сейсмоопасных регионов, – выявление взаимосвязи изменений физических параметров среды, в том числе на основе анализа временных рядов геофизических наблюдений и сейсмических событий, что дает возможность прогнозирования последних». К нескольким сотням уже из-

вестных к настоящему времени предвестников землетрясений относятся и вариации геомагнитного поля, отражающие происходящие в земной коре изменения напряженно-деформированного состояния среды, связанные, в том числе, и с подготовкой и реализацией землетрясений. Некоторые примеры аномальных предвестниковых изменений геомагнитного поля, выявленные на стационарных магнитометрических пунктах, могут быть связаны с конкретными сейсмическими событиями [Abdullabekov et al., 2009]. Так, например, в работе [Hayakawa et al., 2007] сообщается, что магнитное поле может усилиться примерно в течение одной недели за 5–12 дней до землетрясения, после чего следует период затишья и резкое усиление за день до землетрясения (особенно резкое усиление за 3–4 ч до землетрясения). На основе результатов инструментальных наблюдений, выполненных в ряде магнитных обсерваторий, показано, что сильные землетрясения сопровождаются повышенными вариациями магнитного поля Земли [Spivak, Riabova, 2019]. Для прогнозирования силы, места и времени возникновения землетрясения, хоть и с некоторыми погрешностями, необходимо создать научно обоснованную сеть комплексных сейсмопрогностических наблюдений с учетом геолого-тектонических, сеймотектонических особенностей региона.

Начало геомагнитным наблюдениям было положено в 1982 г., однако в электронной базе данных по

магнитометрии содержится информация начиная с 1994 г. В настоящей статье использованы данные лишь по стационарным пунктам сети мониторинга ИС РАН, поскольку информация, получаемая с рядовых пунктов наблюдений, малоинформативна по причине редкой частоты полевых измерений. Для рассмотрения был выбран период с 2003 по 2007 г., характеризующийся повышенной сейсмической активностью на полигоне и реализацией девяти событий, сопровождающихся афтершоковыми последовательностями. Определенный интерес вызвала серия Кегетинских землетрясений, имевших место в восточной части Бишкекского геодинамического полигона (БГП) в 2017 г. Заслуживающим внимания стало и Учтурфанское землетрясение 22.01.24 с магнитудой 7.0 на границе Китая и Киргизии, произошедшее примерно в 400 км к юго-востоку от сети геомагнитных наблюдений ИС РАН.

Бишкекский геодинамический полигон (рис. 1) расположен в пределах центрального сегмента Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенерирующей зоны. С 1994 по 2023 г. было зарегистрировано 12823 землетрясения, из них 8923 непосредственно в пределах БГП (41.5–43.5° с.ш.; 73–77° в.д.). Последним крупным сейсмическим событием, имевшим место на территории БГП, было Суусамырское землетрясение (19.08.1992 г., $K=17$), которое сопровождалось большим числом афтершоков (по некоторым данным зарегистрировано более 2500 землетрясений) в течение пяти лет. В последующие годы энергетический класс главных событий афтершоковых последовательностей не превышал значения $K=14.8$.

На основе анализа данных сейсмологической сети KNET (ИС РАН), работающей в режиме реального времени, после вышеупомянутого землетрясения на территории БГП и в ее ближайших окрестностях была выявлена 21 афтершоковая последовательность с числом афтершоков $N \geq 10$. Их детальный анализ изложен в работе [Sycheva, Muhamadeeva, 2020]. В этой же статье основной акцент сделан на отражении афтершоковых последовательностей в геофизических полях, а точнее, на временных рядах разности модуля полного вектора магнитного поля ΔT .

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Сеть геомагнитных наблюдений включает в себя семь стационарных и девять рядовых пунктов (рис. 2). Выбор места для стационаров (станций) оказался не случаен. Они расположены вдоль зоны сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины, характеризующейся высокой плотностью землетрясений (за исключением станции Карагай-Булак, удаленной примерно на 150 км к востоку от основных пунктов сети и расположенной на северном берегу оз. Иссык-Куль), и данные, получаемые со стационаров, представляют наибольший интерес.

Измерения полного вектора геомагнитного поля T производятся на стационарных и рядовых пунктах сети мониторинга высокоточными магнитовариационными станциями MB-07 и POS-1 (точность ± 0.01 нТл) в автоматическом режиме, круглосуточно, с фиксацией данных через каждые 20 с. На станции Ак-Суу (рис. 2) дискретность измерений составляет 5 с, она является

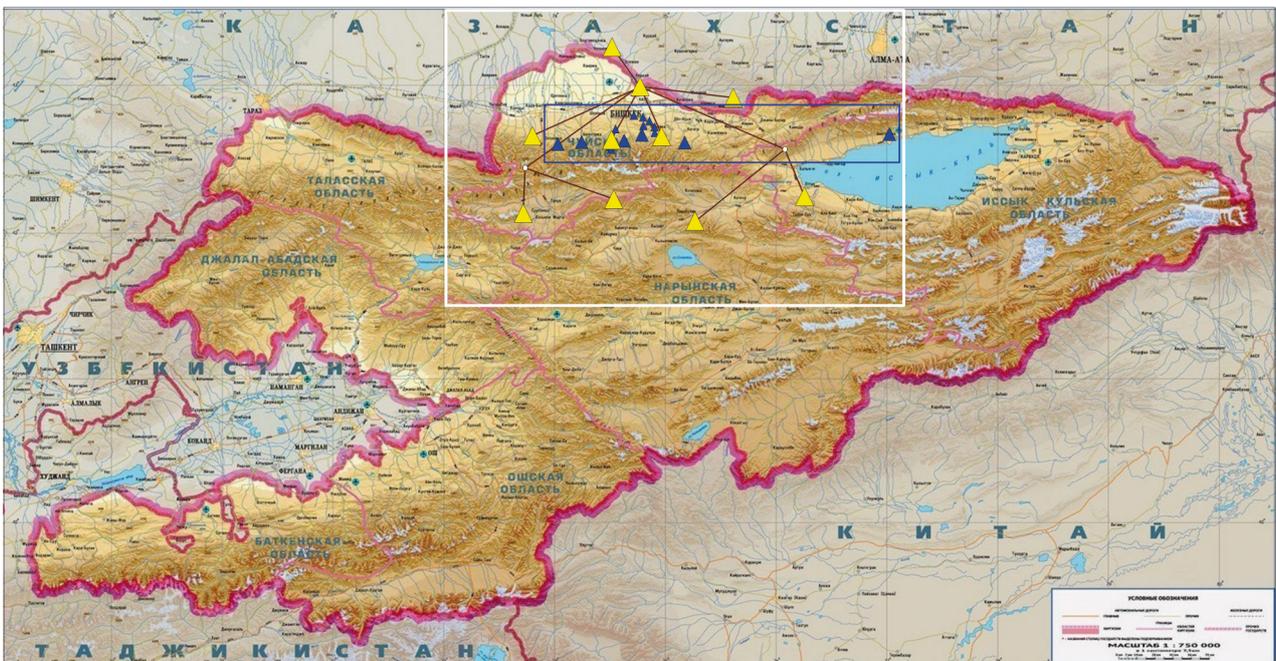


Рис. 1. Обзорная карта Кыргызстана (<https://www.globusoff.ru/191931-administrativnaya-karta-kirgizii-120-85-sm.html>). Белым цветом выделен контур БГП, синим цветом – контур сети геомагнитных наблюдений.

Fig. 1. Overview map of Kyrgyzstan (<https://www.globusoff.ru/191931-administrativnaya-karta-kirgizii-120-85-sm.html>). The BGP is contoured in white, the blue contours indicate the geomagnetic observation network.

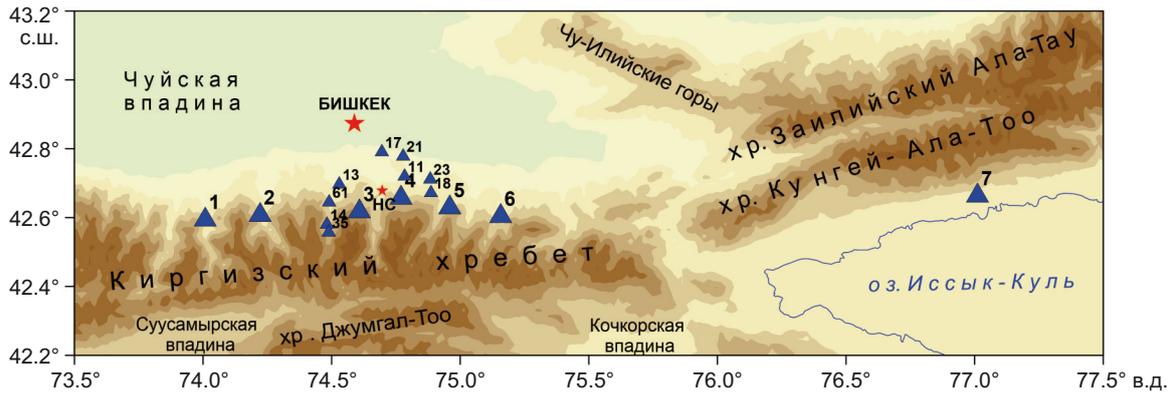


Рис. 2. Схема расположения пунктов геомагнитных наблюдений.

Стационары: 1 – Ак-Суу, 2 – Шавай, 3 – Чункурчак, 4 – Таш-Башат, 5 – Иссык-Ата, 6 – Кегеты, 7 – Карагай-Булак. Рядовые пункты: 11 – Норуз, 13 – Кашка-Суу, 14 – Ала-Арча средняя, 17 – Ала-Тоо, 18 – Тогузбулак, 21 – Дачи, 23 – Горная Серафимовка, 35 – Ала-Арча верхняя, 61 – Шлагбаум.

Fig. 2. Schematic location of the geomagnetic monitoring sites.

Stationary sites: 1 – Ak-Suu, 2 – Chauvay, 3 – Chunkurchak, 4 – Tash-Bashat, 5 – Issyk-Ata, 6 – Kegety, 7 – Karagay-Bulak. Intermediate sites: 11 – Noruz, 13 – Kashka-Suu, 14 – Srednyaya Ala-Archa, 17 – Ala-Too, 18 – Toguzbulak, 21 – Dachi, 23 – Gornaya Serafimovka, 35 – Verkhnyaya Ala-Archa, 61 – Shlagbaum.

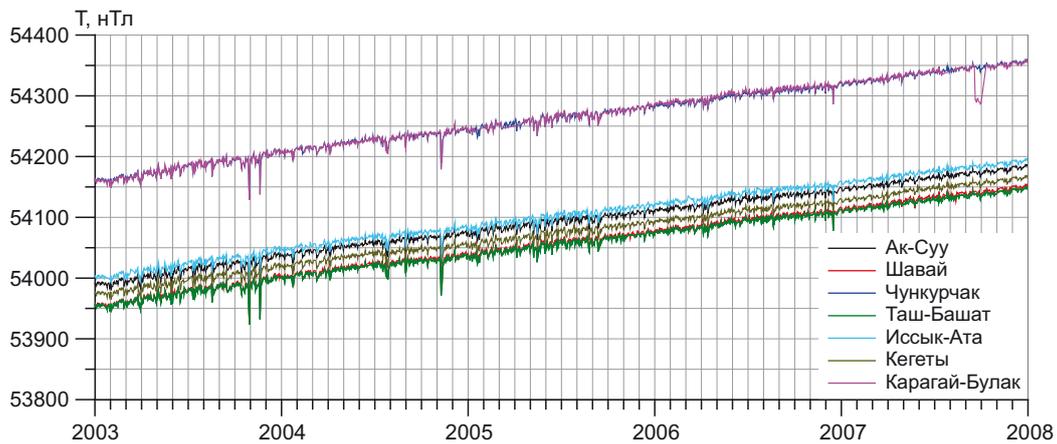


Рис. 3. Фрагмент графиков полного вектора магнитного поля T для стационарных пунктов геомагнитных наблюдений.

Fig. 3. A fragment of the graphs of the module of the total magnetic field vector T for stationary geomagnetic monitoring sites.

базовой, и относительно нее при обработке данных используется методика вычисления разности модуля полного вектора магнитного поля ΔT . На рис. 3 представлены фрагменты временных рядов полного вектора магнитного поля T для стационарных пунктов геомагнитных наблюдений, очищенные от выбросов, вызванных техногенными и природными факторами, благодаря разработанной сотрудниками ИС РАН методике выявления выбросов на основе фильтра Хампеля [Imashev, Lazareva, 2022].

Относящиеся к стационарам временные ряды ΔT начиная с 1994 г. представлены на рис. 4. Нетрудно заметить, что графики ΔT для разных стационарных пунктов отличаются друг от друга. Различия в протекании вариаций на геомагнитных станциях сети могут быть связаны с расположением конкретной станции относительно источника деформационного процесса; с различием физических, в том числе и магнитных,

свойств пород, подстилающих конкретную геомагнитную станцию; с разным геологическим и геоэлектрическим строением разреза под отдельно взятой станцией; с присутствием в районе расположения пунктов наблюдения токовых систем различной природы, не связанных с геодинамическими процессами [Report..., 1994; Velikhov, Zeigarnik, 1993].

При анализе вариаций геомагнитного поля и их связи с сейсмическими событиями используется каталог землетрясений, созданный на основе данных сейсмологической сети KNET (рис. 5). Однако прежде чем приступить к анализу выявленных вариаций ΔT , следует дать некоторую характеристику рассматриваемой территории с точки зрения сейсмологии.

В среднем каждый год сетью KNET регистрируется около 300 землетрясений. Это главным образом слабые землетрясения с энергетическим классом $K=6-8$, в меньшей степени – события 9-го класса.

В каталоге KNET в период с 1994 по 2023 г. было выявлено 483 землетрясения с энергетическим классом $K \geq 10$, из них было отобрано 21 землетрясение, каждое из которых сопровождалось десятью и более афтершоками. Они достаточно подробно описаны в работе [Mukhamadeeva, Sycheva, 2018], их основные харак-

теристики представлены в табл. 1. Следует заметить, что представленные в таблице события относятся к периоду с 1996 по 2017 г. После 2017 г. и до начала 2024 г. землетрясения с $K \geq 10$, имеющие афтершоковые последовательности с числом афтершоков $N \geq 10$, в каталоге отсутствуют.

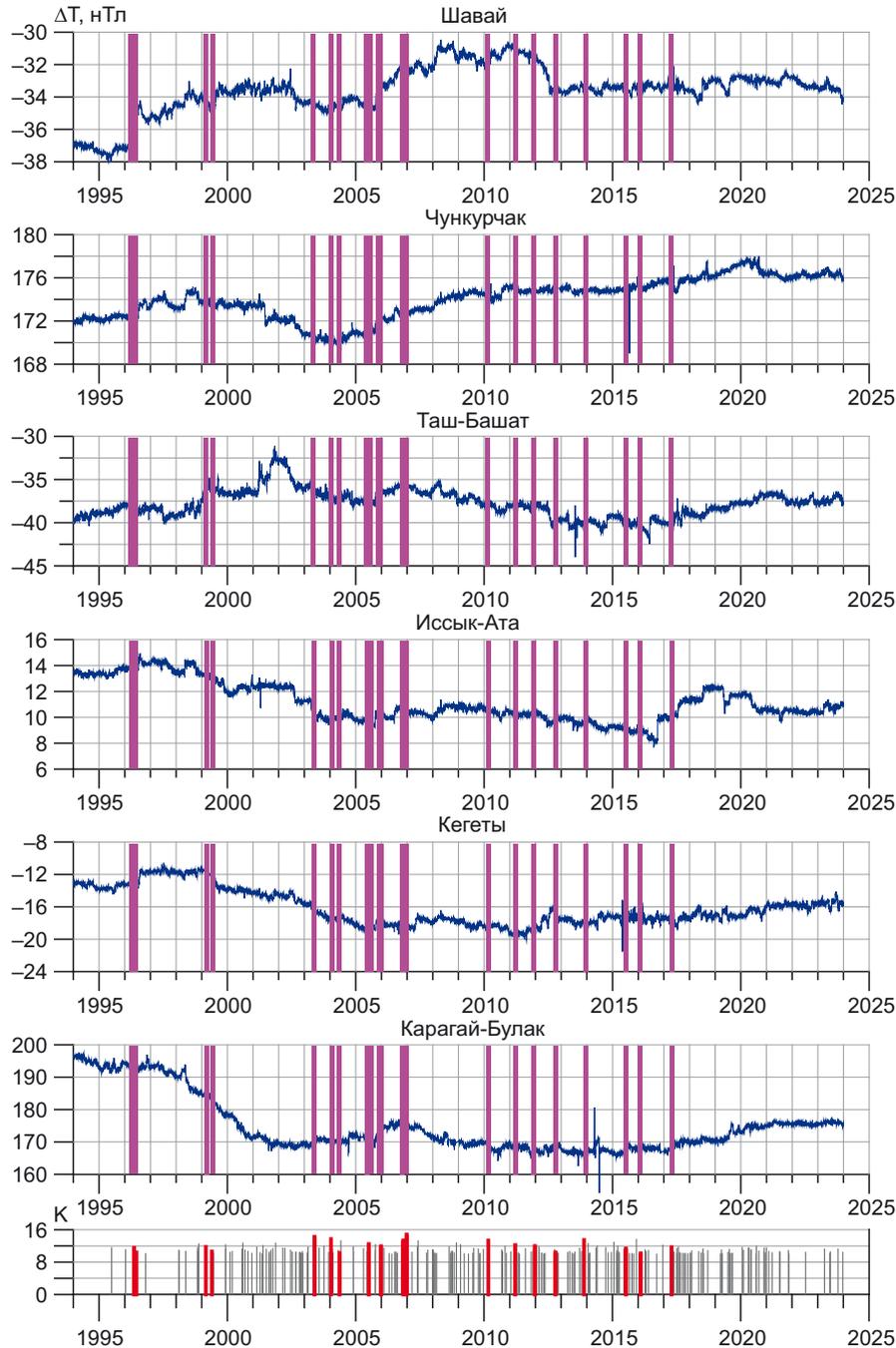


Рис. 4. Графики разности модуля полного вектора магнитного поля ΔT для стационарных пунктов сети геомагнитных наблюдений.

На шкале землетрясений красным цветом выделены главные события афтершоковых последовательностей (на графиках ΔT они представлены полосками розового цвета), серым цветом обозначены события с $K \geq 10$, одиночные или с малым числом афтершоков, имевшие место на территории БГП.

Fig. 4. Graphs of the difference in the modulus of the total magnetic field vector ΔT for stationary geomagnetic monitoring sites. The main events of the aftershock sequences are highlighted in red on the seismic scale and shown by pink stripes in the ΔT graphs; gray indicates events with $K \geq 10$, either single or with a small number of aftershocks that took place on the territory of the BGP.

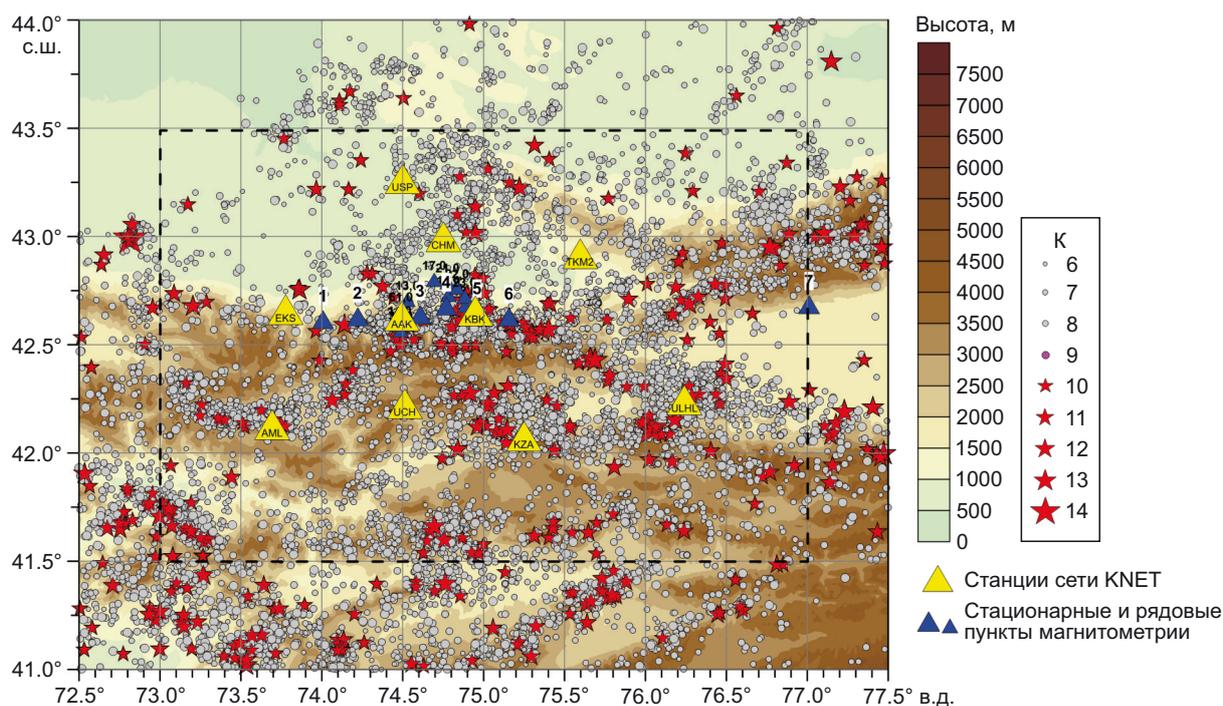


Рис. 5. Местоположение пунктов сейсмологической сети KNET и геомагнитных наблюдений на фоне сейсмичности в пределах БГП за период с 1994 по 2023 г.

Fig. 5. The location of KNET seismological network stations and geomagnetic monitoring sites in relation to seismic activity within the BGP area from 1994 to 2023.

Таблица 1. Основные характеристики главных событий и их афтершоковых последовательностей
Table 1. Main characteristics of the main events and their aftershock sequences

№	Дата	Время	φ	λ	H	K _{ME}	N _{aft}	K _{aft max}	T _{aft}	T _{aft max}	R _{aft max}	r
1	14.05.1996	12:45:27	41.537	74.968	21.2	11.5	15	8.6	169	0.02	6.477	129
2	16.06.1996	19:39:14	42.502	72.909	9.0	10.4	25	9.9	359	15.0	5.522	147
3	27.02.1999	17:15:14	41.273	76.603	0.0	11.7	14	10.7	11	0.01	6.719	221
4	24.05.1999	7:39:21	42.660	75.040	6.8	10.7	16	10.3	139	23.0	1.634	28
5	22.05.2003	18:11:55	42.989	72.814	7.0	14.3	71	11.5	1265	0.25	11.141	158
6	16.01.2004	9:06:17	42.549	75.297	14.0	13.7	30	10.5	602	2.00	11.53	51
7	13.05.2004	22:37:09	42.613	74.622	12.6	10.2	26	9.2	272	1.00	2.453	10
8	05.07.2005	3:07:24	41.598	74.758	18.4	12.5	18	9.0	566	0.19	10.694	120
9	07.07.2005	19:22:05	42.657	74.836	11.9	10.9	13	10.8	207	0.07	2.451	12
10	27.12.2005	0:55:30	42.711	75.895	6.2	11.6	14	9.5	300	200	7.424	98
11	28.12.2005	1:52:48	42.689	75.410	12.5	11.9	14	10.5	19	1.00	7.425	58
12	08.11.2006	2:21:26	42.565	75.356	18.6	13.4	35	13.3	705	211	5.836	55
13	25.12.2006	20:00:58	42.112	76.032	0.1	14.8	54	10.3	1243	0.01	6.663	126
14	02.03.2010	1:55:36	42.433	75.661	19.3	13.3	33	11.0	896	0.1	2.369	83
15	18.03.2011	9:36:26	43.016	74.948	16.3	12.2	23	10.5	619	5.00	10.137	43
16	24.12.2011	9:20:07	41.638	73.192	11.2	12.0	11	7.9	209	18.0	10.83	169
17	14.10.2012	16:30:08	40.900	74.140	0.0	10.4	16	10.3	346	270	5.039	203
18	23.11.2013	9:42:06	42.427	75.687	9.9	13.5	16	8.4	91	0.10	4.677	86
19	10.07.2015	0:31:57	41.137	74.134	0.0	11.4	15	10.7	301	83.0	5.619	177
20	08.02.2016	10:24:12	42.590	75.154	10.3	10.2	34	10.0	285	2.00	2.455	38
21	21.04.2017	0:55:43	42.591	75.164	11.6	11.7	76	11.7	224	0.10	3.33	40

Примечание. φ – долгота, град.; λ – широта, град.; H – глубина гипоцентра, км; K_{ME} – класс главного события (ME – Main Event); N_{aft} – количество афтершоков; K_{aft max} – класс сильнейшего афтершока; T_{aft} – продолжительность афтершоков, дни; R_{aft} – радиус афтершоковой области, км; r – расстояние от сети мониторинга, км.

Note. φ – longitude, degrees; λ – latitude, degrees; H – hypocentral depth, km; K_{ME} – class of the main event (ME – Main Event); N_{aft} – number of aftershocks; K_{aft max} – class of the strongest aftershock; T_{aft} – duration of aftershocks, days; R_{aft} – radius of the aftershock area, km; r – distance from the monitoring network, km.

Акцент на сейсмических событиях с афтершоками обусловлен тем, что разрядка накопившихся в некотором объеме земной коры напряжений происходит на относительно небольшой площади и является не одномоментным, в отличие от одиночных событий с $K > 10$, а более продолжительным во времени процессом, который сопровождается постоянным выделением энергии, и становится более вероятной их фиксация на графиках ДТ.

Согласно табл. 1 и рис. 6 все события условно можно разделить на далекие, удаленные и близкие, расположенные от центра сети мониторинга на расстоянии 150–220, 100–150 и 0–100 км соответственно.

Большая часть эпицентров главных событий сосредоточена на Киргизском хребте, на всем его протяжении, в особенности в его восточной части, а также на западных границах хребтов, оконтуривающих оз. Иссык-Куль с севера и с юга. Меньшая часть находится на территории Срединного Тянь-Шаня (южнее 42° с.ш.) и на границе с Юго-Западным Тянь-Шанем вдоль Ферганского хребта – на его северо-восточных склонах.

Следует заметить, что рассматриваемые авторами последовательности по своим характеристикам, конечно же, не идут ни в какое сравнение с Суусамырским землетрясением 19.08.1992 г. с $K=17$, когда только за последние 16 часов до окончания суток было зарегистрировано 60 землетрясений 10–17-го класса (рис. 6). Пространственно эпицентры большей части главных событий приурочены к тектоническим нарушениям разного порядка и типа, выделенным по результатам геологических и геофизических работ [Pogrebnoi, Grebennikova, 2015].

В плане (рис. 7) афтершоковые последовательности выглядят следующим образом: 1) в центре – главное

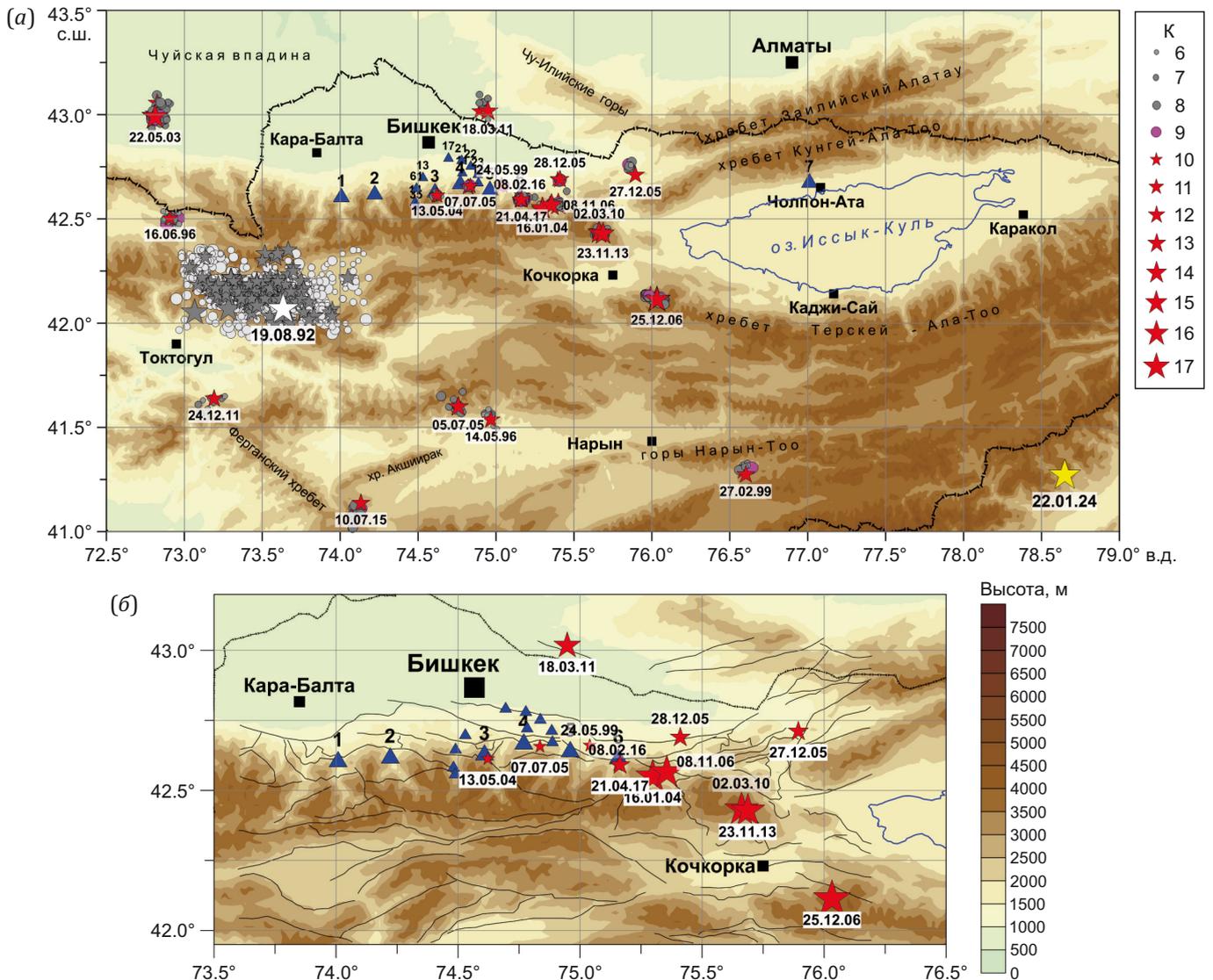


Рис. 6. Положение эпицентров главных событий афтершоковых последовательностей на БГП ($41.5\text{--}43.5^\circ$ с.ш.; $73\text{--}77^\circ$ в.д.) и в его окрестностях (а) с детализацией участка к юго-востоку от г. Бишкека (б). Черными линиями выделены разломы.

Fig. 6. The location of the epicenters of the main events of aftershock sequences at the BGP ($41.5\text{--}43.5^\circ$ N; $73\text{--}77^\circ$ E) (a) and in its vicinity with a detailed section to the southeast of Bishkek (b). Faults are highlighted with black lines.

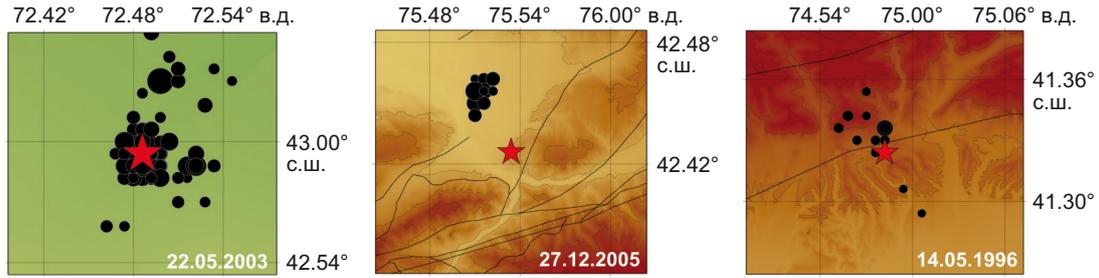


Рис. 7. Некоторые типы конфигураций афтершоковых последовательностей в плане.
 Fig. 7. Some types of aftershock sequence configurations in plan.

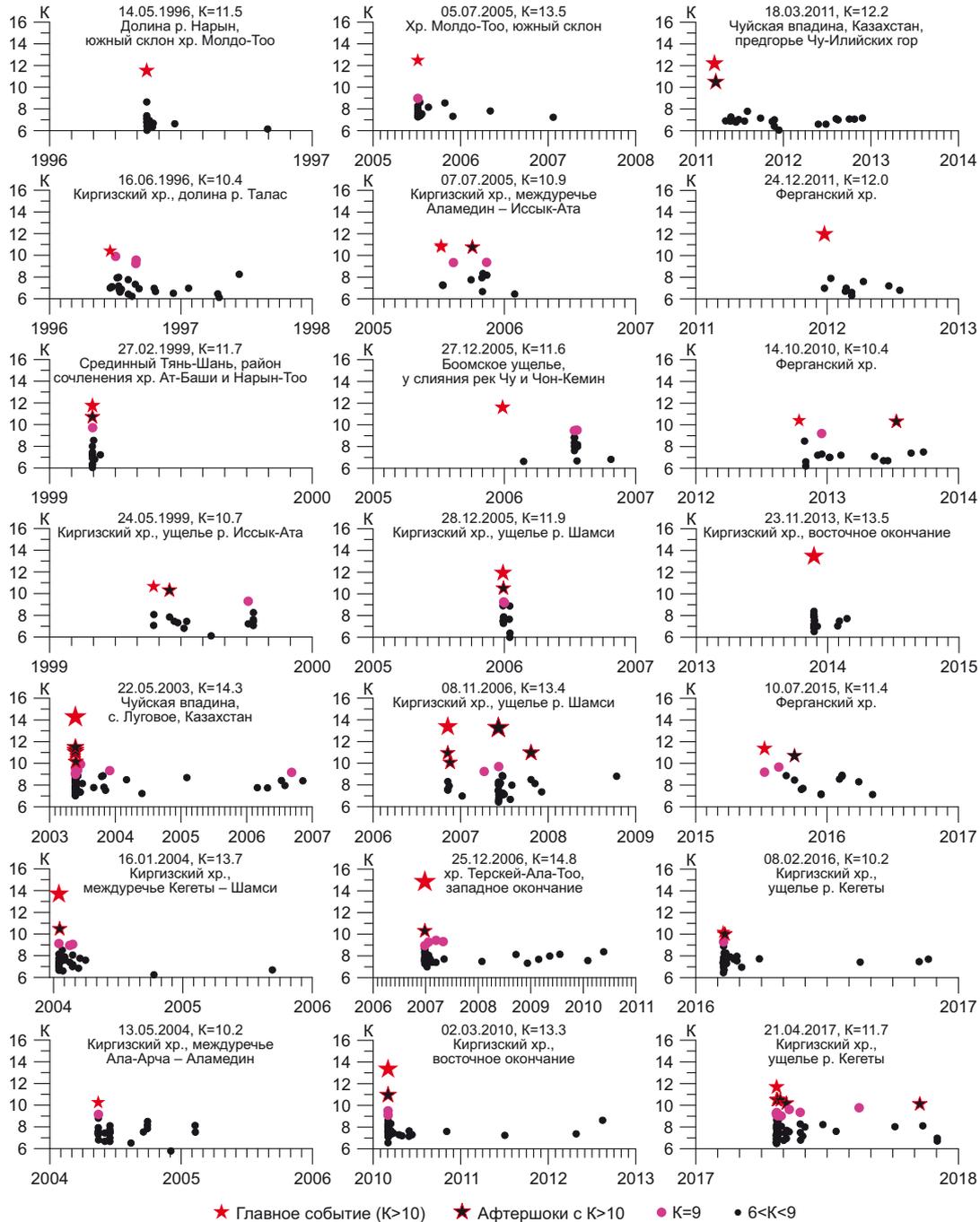


Рис. 8. Временные ряды рассматриваемых афтершоковых последовательностей.
 Fig. 8. Time series of the considered aftershock sequences.

событие, а вокруг облако афтершоков; 2) главное событие находится несколько в стороне от скопления афтершоков; 3) афтершоки вытянуты в полосу, а главное событие или внутри, или у края полосы.

Временные ряды афтершоковых последовательностей, представленных на рис. 8, можно разделить на три типа, когда они реализуются:

- в один этап – например, 16.01.2004 (в течение 75 дней произошло 26 афтершоков, один из которых, 18.01.2004, с $K=10.5$);

- в два этапа – например, 07.07.2005 с $K=10.9$ и 10.8 (здесь речь идет о парном главном событии, или иначе, о двух землетрясениях, случившихся с разницей в 1.5 ч) с 14 афтершоками, один из которых с $K=10.8$ имел место 03.10.2004, продолжительностью 205 дней;

- и, реже, в три этапа – например, 08.11.2006, $K=13.4$, с 35 афтершоками, в число которых вошли четыре события с $K>10$: 08.11.2006, $K=10.9$, 17.11.2003, $K=10.1$, 06.06.2007, $K=13.3$, 21.10.2007, $K=11$, продолжительностью 704 дня.

К числу последних можно отнести самое длительное по афтершоковой деятельности (1265 дней) Луговское землетрясение 22.03.2005 с $K=14.3$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно гистограмме распределения энергии E , выделившейся в результате реализации сейсмических событий по годам для территории БГП (рис. 9), наиболее «урожайными» на землетрясения оказались годы с 2003 по 2007. Местоположение и некоторые характеристики

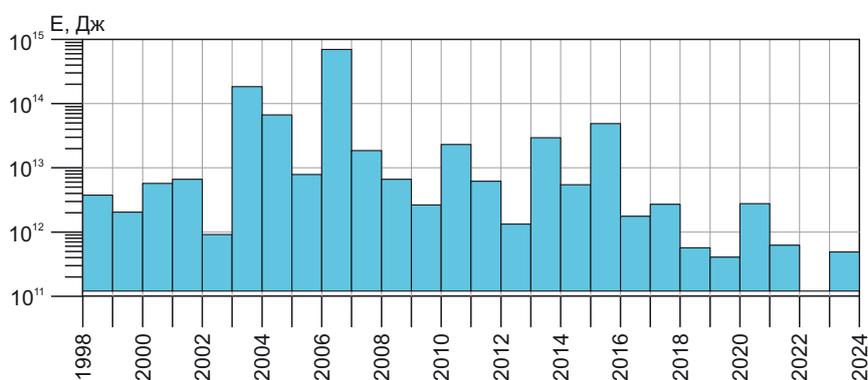


Рис. 9. Гистограмма распределения сейсмической энергии по годам.

Fig. 9. Histogram of seismic energy distribution by years.

Таблица 2. Главные события и их афтершоки, зарегистрированные в 2003–2007 гг.

Table 2. Main events and their aftershocks recorded in 2003–2007

№ п/п	Дата главного события	Широта	Долгота	Глубина, км	Класс, К	Описание местоположения	Приуроченность к тектоническим нарушениям
1	22.05.2003	42.989	72.814	7.0	14.3	Чуйская впадина, Казахстан, с. Луговое	
2	16.01.2004	42.549	75.297	14.0	13.7	Киргизский хребет, междуречье Кегеты–Шамси	В зоне Шамси-Тюндюкского разлома
3	13.05.2004	42.613	74.622	12.6	10.2	Киргизский хребет, междуречье Ала-Арча–Аламедин	В зоне Чун-Курчакского разлома
4	05.07.2005	41.598	74.758	18.4	12.5	Хребет Молодо-Тоо, южный склон	В зоне Каиндинского разлома
5	07.07.2005	42.657	74.836	11.9	10.9	Киргизский хребет, междуречье Аламедин–Иссык-Ата	В зоне Шамси-Тюндюкского разлома
6	27.12.2005	42.711	75.895	6.2	11.6	На границе Киргизского и Заилийского Ала-Тоо, у слияния рек Чу и Кемин	
7	28.12.2005	42.689	75.410	12.5	11.9	Киргизский хребет, ущелье р. Шамси	В зоне Иссык-Атинского разлома
8	08.11.2006	42.565	75.356	18.6	13.4	Киргизский хребет, ущелье р. Шамси	В зоне Шамси-Тюндюкского разлома
9	25.12.2006	42.112	76.032	0.1	14.8	Хребет Терской-Ала-Тоо, западное окончание	

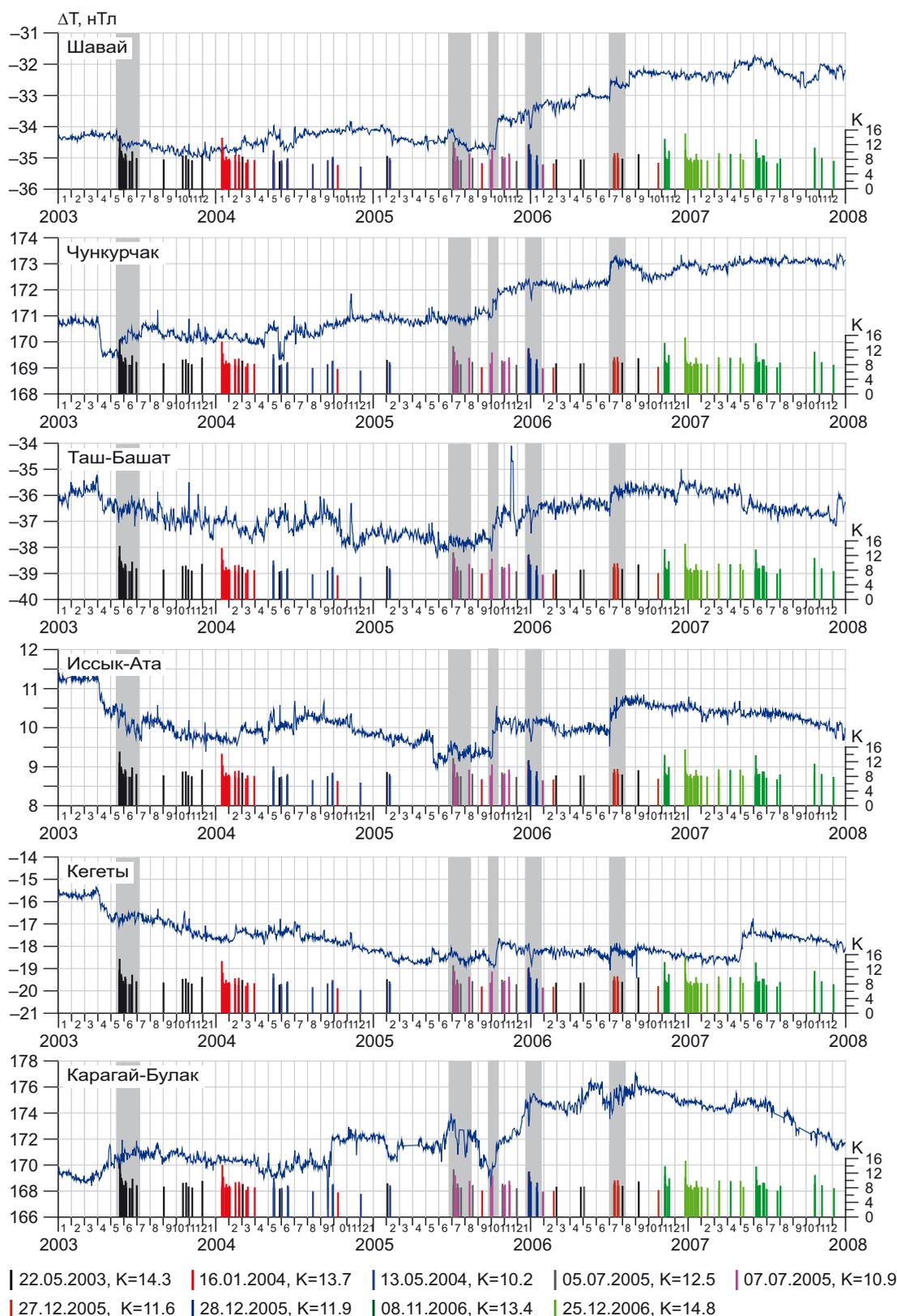


Рис. 10. Фрагменты временных рядов ΔT для стационарных пунктов геомагнитных наблюдений с вынесенными (определенным цветом) на шкалу времен афтершоковыми последовательностями.

Fig. 10. Fragments of time series ΔT for stationary geomagnetic monitoring sites with time-scaled certain-colored aftershock sequences.

главных событий афтершоковых последовательностей, зарегистрированных в этот период, представлены в табл. 2.

Как следует из табл. 2, большая часть землетрясений локализована в районе Киргизского хребта. Представленные в табл. 2 сейсмические события находят отражение во временных рядах ΔT (рис. 10).

Однако прежде чем приступить к рассмотрению связи вариаций геомагнитного поля с событиями, представленными в табл. 1, 2, необходимо удостовериться в отсутствии в эти периоды магнитных бурь.

Интенсивность геомагнитной бури обычно описывается индексами DST и Kp. С ростом интенсивности бури индекс DST уменьшается. Так, умеренные бури характеризуются DST от -50 до -100 нТл, сильные – от -100 до -200 нТл и экстремальные – выше -200 нТл. Согласно данным Аналитического центра по геомагнетизму и космическому магнетизму (Киото, Япония, <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>), средние значения DST-индекса в периоды для рассмотренных примеров (рис. 10) не превышают -69 нТл, что свидетельствует об отсутствии сильных магнитных возмущений в это время и дает основание рассматривать вариации во временных

рядах ΔT как отклик на рассматриваемые сейсмические события (табл. 3).

Формат настоящей статьи не позволяет детально проанализировать каждое из представленных в табл. 2 землетрясений. Остановимся на более интересных из них.

1. Наиболее продолжительным по афтершоковой деятельности (1265 дней) является Луговское землетрясение, произошедшее 22.05.2003 г. Оно характеризуется достаточно высоким для рассматриваемой территории значением энергетического класса главного события ($K=14.3$). Луговское землетрясение можно назвать землетрясением из «ниоткуда». В старых каталогах не найдено ни одного события с $K>10$ в радиусе примерно 23 км от его эпицентра. Наиболее близкие единичные события 10-го класса и выше имели место в период с 1933 по 1954 г.

По отношению к Луговскому землетрясению, вероятно, в полной мере справедливо предположение о том, что процессы релаксации тем продолжительнее и интенсивнее, чем ниже средняя сейсмическая активность в регионе, где они происходят [Lutikov et al., 2017]. Как нетрудно заметить на рис. 10, Луговскому

Таблица 3. Среднесуточные значения DST-индекса для рассматриваемых событий

Table 3. Average daily values of the DST index for the above events

№	Дата	Время	Среднесуточные значения DST-индекса						
			В дни до события			В день события	В дни после события		
1	14.05.1996	12:45:27	1	5	-7	-14	-14	-14	-16
2	16.06.1996	19:39:14	6	3	9	1	-4	3	-3
3	27.02.1999	17:15:14	-14	-18	-9	-8	-12	-69	-48
4	24.05.1999	7:39:21	5	10	13	21	-15	-2	4
5	22.05.2003	18:11:55	-12	-12	-15	-43	-28	-26	-24
6	16.01.2004	9:06:17	-13	-15	-20	-26	-22	-19	-17
7	13.05.2004	22:37:09	4	8	-7	-7	1	-8	-3
8	05.07.2005	3:07:24	-9	-5	-1	3	7	5	11
9	07.07.2005	19:22:05	-1	3	7	5	11	-22	-43
10	27.12.2005	0:55:30	0	-9	-4	-4	-22	-19	-11
11	28.12.2005	1:52:48	-9	-4	-4	-22	-19	-11	-10
12	08.11.2006	2:21:26	-14	-6	-5	2	4	-44	-30
13	25.12.2006	20:00:58	-40	-42	-35	-31	-28	-24	-18
14	02.03.2010	1:55:36	-1	6	5	-3	-8	-14	-9
15	18.03.2011	9:36:26	-6	0	1	-4	2	-7	-5
16	24.12.2011	9:20:07	-5	-10	-2	1	-1	-1	9
17	14.10.2012	16:30:08	-27	-21	-59	-41	-28	-15	-15
18	23.11.2013	9:42:06	-6	-2	0	-10	-6	-2	4
19	10.07.2015	0:31:57	-27	-20	-13	-5	-23	-24	-50
20	08.02.2016	10:24:12	-13	-8	-12	-29	-10	-17	-25
21	21.04.2017	0:55:43	6	-11	-33	-18	-48	-44	-41

землетрясению, произошедшему в 158 км к северо-западу от центра сети геомагнитных наблюдений, предшествовал резкий спад значений ΔT в течение примерно двух месяцев: на ст. Чункурчак – на 1.2 нТл, на ст. Таш-Башат – на 1.1 нТл, на ст. Иссык-Ата – на 0.8 нТл, на ст. Кегеты – на 1.5 нТл. На ст. Карагай-Булак, удаленной от эпицентра Луговского землетрясения, отмечалось обратное – рост ΔT . На большинстве станций сети эффект от подготовки землетрясения оказался выраженным гораздо ярче, чем при его реализации.

2. Наблюдаемые в июле 2005 г. вариации ΔT были связаны с двумя событиями, случившимися 05.07.2005 г. с $K=12.5$ на южном склоне хребта Молодо-Тоо, в 120 км к югу от сети мониторинга, и 07.07.2005 г. с $K=10.9$ с эпицентром и афтершоками внутри сети мониторинга, в 5 и 10 км от ст. Таш-Башат и Иссык-Ата соответственно. Афтершоковая последовательность для первого землетрясения была представлена событиями 6–9-го класса, тогда как афтершоковая последовательность землетрясения 07.07.2005 г. с $K=10.9$ (см. рис. 8) включала в себя два события, энергетические классы которых были сравнимы с классом главного толчка.

С учетом удаленности землетрясения 05.05.2007 г. с $K=12.5$ от сети мониторинга и наличия в афтершоковой последовательности лишь слабых событий, на графиках ΔT , вероятнее всего, отражается эффект от более близких к пунктам геомагнитных наблюдений землетрясений 07.07.2005 г. с $K=10.9$ и $K=10.8$ (их можно рассматривать как парное главное событие афтершоковой последовательности), но в большей степени на временных рядах проявился эффект от второго этапа афтершоковой деятельности, начавшегося с землетрясения 03.10.2005 г. с $K=10.8$ (см. рис. 8), именно с ним связан «всплеск» значений ΔT на станциях Иссык-Ата, Таш-Башат, Чункурчак и Шавай на 1.1, 1.35, 0.95 и 0.93 нТл соответственно (рис. 10).

3. Более интересный случай имел место в конце декабря 2005 г. в восточной части полигона. На границе Киргизского и Заилийского Ала-Тоо, в устье р. Чон-Кемин (рис. 11), произошло событие 27.12.2005 г. с $K=11.6$. Ровно через сутки, 28.12.2005 г., в 40 км к западу от него случилось второе событие с $K=11.9$, эпицентр которого располагался на Киргизском хребте, в ущелье р. Шамси. Оно сопровождалось афтершоками в течение 20 дней. Затем в 50 км к востоку от землетрясения в ущелье р. Шамси с 13.07.2006 г. наблюдалась целая серия слабых событий, которая представляла собой афтершоки землетрясения в устье р. Чон-Кемин 27.12.2005 г.

Видимо, имел место некий эффект «отложенных» афтершоков, проявившийся спустя шесть с половиной месяцев с момента главного толчка при удалении от эпицентра главного события на 6–8 км к северу. Именно июльскими афтершоками 2006 г., вероятнее всего, был инициирован процесс резкого роста ΔT на некоторых стационарных пунктах сети (например, на пунктах Чонкурчак и Иссык-Ата).

4. Значимые изменения разности модуля полного вектора магнитного поля ΔT могут быть связаны с конкретными сейсмическими событиями, например с серией Кегетинских землетрясений в апреле 2017 г., названных так по находящемуся в крайней восточной части сети мониторинга одноименному поселку Кегеты [Mukhamadeeva, 2021].

В течение последних десяти лет участок территории, где впоследствии произошли землетрясения, характеризовался слабой сейсмичностью. Активизация сейсмических процессов началась в декабре 2015 г., до весны 2017 г. усиливалась, и 21 апреля 2017 г. в 2.6–2.8 км от ст. Кегеты с интервалом в 14 мин произошло два землетрясения с энергетическим классом $K=11.6$ (00:41:52.43) и $K=11.7$ (00:55:43.91), которые

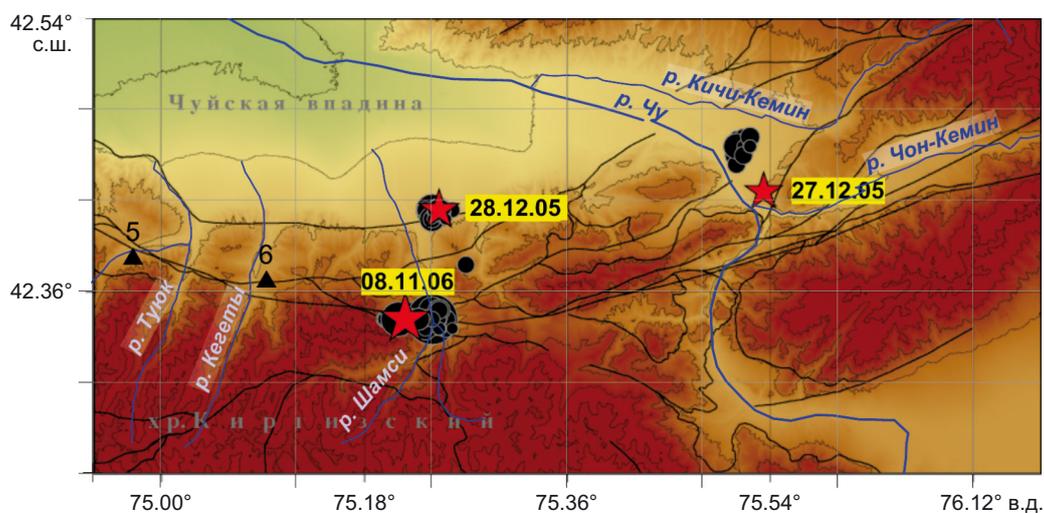


Рис. 11. Местоположение эпицентров главных событий 27.12.2005 г. ($K=11.6$) и 28.12.2005 г. ($K=11.9$) (красные звездочки) и их афтершоков (черные кружки).

Fig. 11. Location of epicenters of the main events of 27.12.2005 ($K=11.6$) and 28.12.2005 ($K=11.9$) (red asterisks) and their aftershocks (black circles).

предварялись форшоками и затем сопровождалась афтершоками (рис. 12). Всего было зафиксировано 76 афтершоков (62 из них только в первые сутки) с энергетическим классом от 6 до 10.5 и продолжительностью 224 дня.

Эпицентры сейсмических событий оказались сконцентрированными на южном, взброшенном, крыле Шамсинско-Тюндюкского разлома (рис. 12). Разлом имеет достаточно крутое падение в южном направлении (не менее 60°) [Rebetsky, Kuzikov, 2016]. По мнению геологов, в условиях субмеридионального сжатия происходит надвигание Киргизского хребта на Чуйскую впадину. По всей видимости, и возросшая сейсмическая активность в предгорной зоне Киргизского хребта в районе Кегетов в 2017 г. является следствием активизации тектонических процессов на одном из фрагментов зоны сочленения вышеупомянутого хребта с Чуйской впадиной и связана с подвижками по Шамсинско-Тюндюкскому разлому и разрядкой накопившихся в земной коре напряжений.

Этап подготовки Кегетинских землетрясений отражился на временных рядах ΔT задолго до их реализации в апреле – мае 2017 г., и вызванные предстоящими сейсмическими событиями изменения напряженно-деформированного состояния среды охватили всю территорию, занятую пунктами сети геомагнитного мониторинга. На станциях сети Шавай, Чункурчак, Таш-Башат, Иссык-Ата, расположенных западнее очаговой зоны Кегетинских землетрясений на расстоянии 77, 45, 33 и 18 км соответственно, в течение двух недель наблюдалось снижение ΔT примерно на 0.7–1.0 нТл.

Следует отметить тот факт, что формально главным событием рассматриваемой афтершоковой последова-

тельности считается землетрясение с $K=11.7$, однако за 14 мин до него имели место события с $K=11.6$ и $K=10.6$ (они выступили в роли форшоков), поэтому на временных рядах ΔT в период со второй половины апреля по май 2017 г. отражен некий совокупный эффект от всех упомянутых выше событий, включая пять случившихся в апреле землетрясений-афтершоков 10-го класса (рис. 13).

Реализации Кегетинских землетрясений предшествовал период некоторого сейсмического затишья, и влияние на аномальные вариации ΔT иных, сторонних сейсмических событий оказалось минимальным (см. рис. 12). Видимо, именно с этим фактом связана синхронность в ходе графиков разности модуля полного вектора магнитного поля в период подготовки и реализации упомянутых землетрясений. Однако в большинстве случаев синхронность в ходе графиков наблюдается лишь по отдельным станциям, как, например, до и после события 24.05.1999 г. (рис. 13).

Как нетрудно заметить на рис. 4, 10, 13, вариации ΔT имеют различную конфигурацию. В работе [Semenov, Smekalin, 2011] приводится морфологическая типизация (классификация) гидрогеохимических предвестников землетрясений (рис. 14).

Авторы статьи сочли возможным использовать приведенную выше классификацию для анализа вариаций геомагнитного поля, сделав акцент лишь на самих формах аномальных изменений.

Ниже приведены примеры наиболее распространенных типов вариаций ΔT (рис. 15).

Следует заметить, что вариации геомагнитного поля, сопровождающие землетрясения с афтершоковыми последовательностями (см. табл. 1), фиксируются

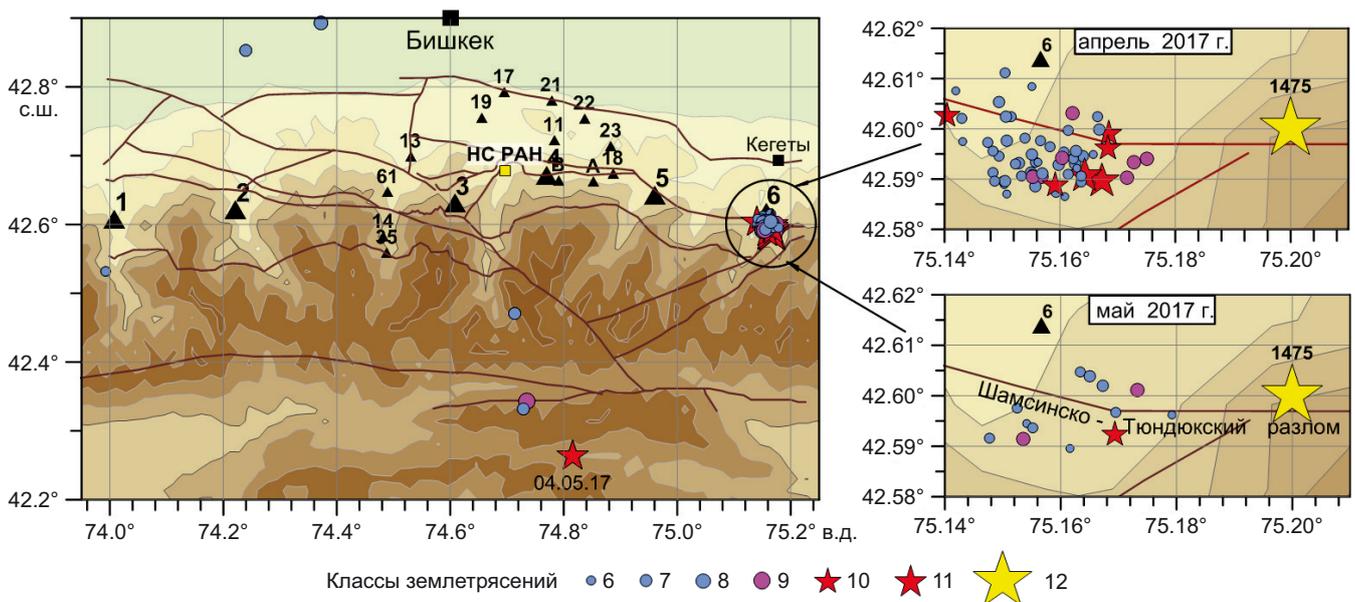


Рис. 12. Тектоническая схема Бишкекского геодинамического полигона с вынесенными на нее пунктами мониторинга, сейсмичностью за апрель – май 2017 г. и эпицентром Баласагунского землетрясения 1475 г.

Fig. 12. Tectonic scheme of the Bishkek geodynamic polygon with monitoring sites placed thereon, seismicity for April – May 2017 and the epicenter of the Balasagun earthquake of 1475.

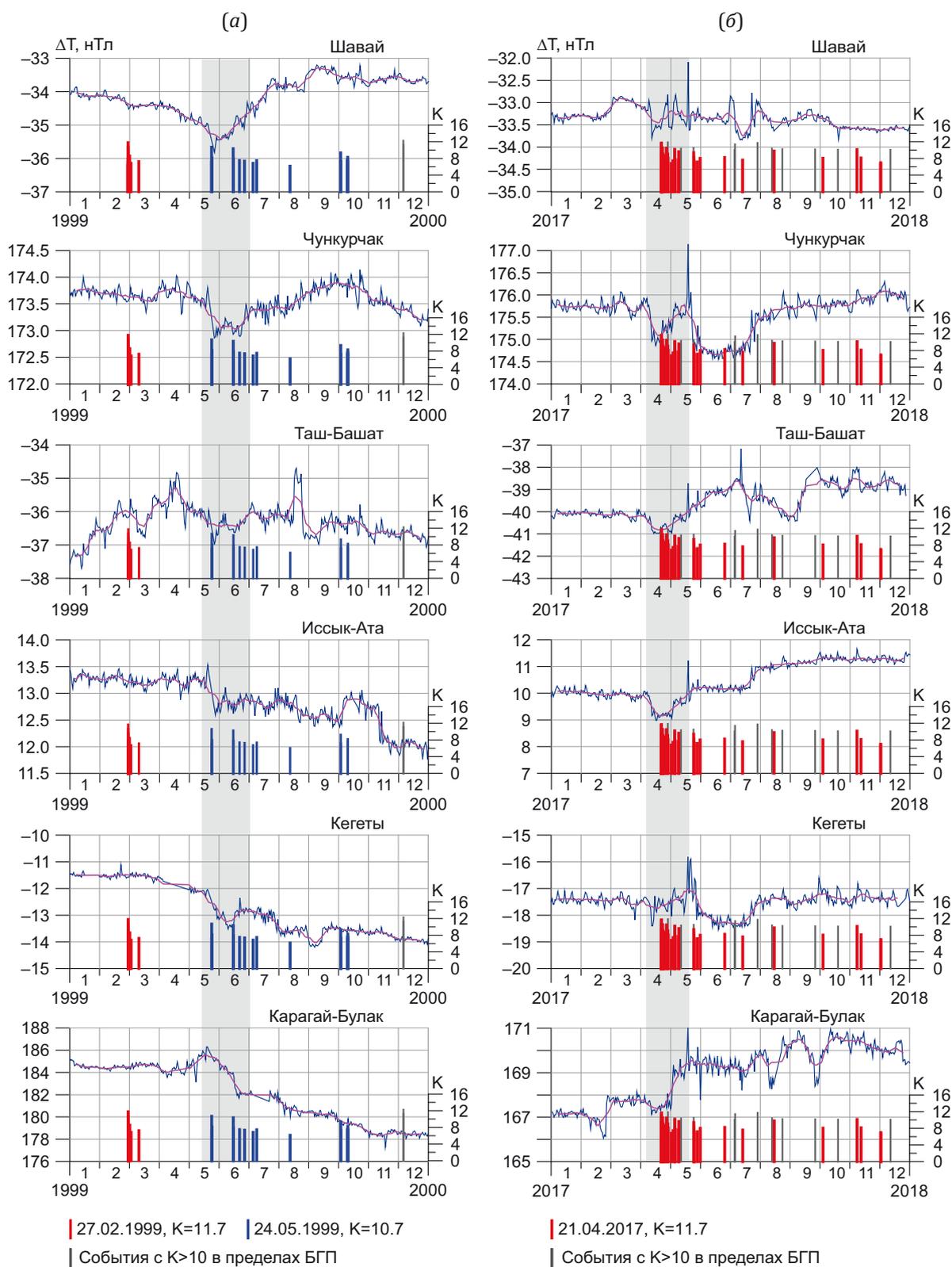


Рис. 13. Фрагменты графиков, на которых отмечаются аномалии ΔT , связанные с событием 24.05.1999 г. и его афтершоками вблизи станции Таш-Башат (а) и с Кегетинскими землетрясениями 2017 г. (б).

Fig. 13. Fragments of graphs showing ΔT anomalies associated with the event of May 24, 1999 and its aftershocks near the Tash-Bashat station (a) and with the Kegety earthquakes of 2017 (б).

на всех станциях сети, особенно это относится к близким и удаленным землетрясениям. Вариации имеют разный знак, амплитуду, продолжительность. Среди морфологических типов вариаций наиболее распространены бухтообразные, в меньшей степени – ступенчатые, скачкообразные и импульсные, последними на графиках часто отмечаются близкие к пунктам

сети наблюдений одиночные (или с малым числом афтершоков) сейсмические события с $K \geq 10$.

Что касается дальних землетрясений (см. табл. 1), то для них в целом характерна слабая выраженность на временных рядах ΔT , как, например, для события 27.02.1999 г. с $K=11.7$ на территории Среднего Тянь-Шаня (см. рис. 6, 13). К наблюдаемым на некоторых

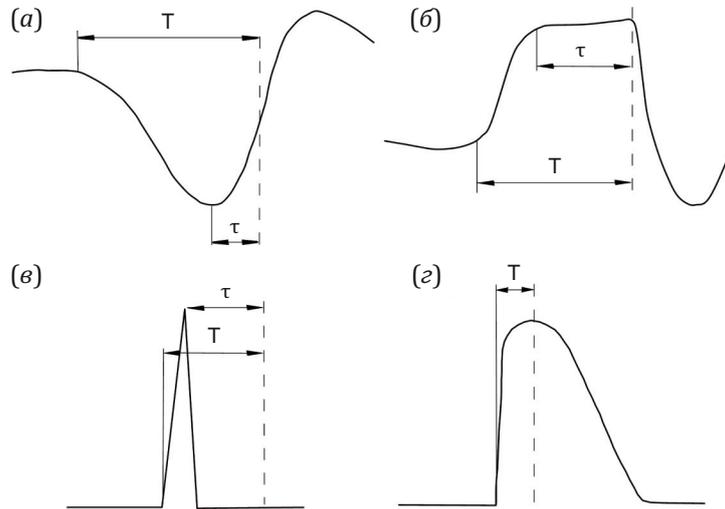


Рис. 14. Основные типы гидрогеохимических предвестниковых эффектов: (а) – бухтообразные, (б) – ступенчатые, (в) – импульсные, (г) – скачкообразные. Т – время предвестника, τ – время экстремума. Штриховой линией обозначен условный момент землетрясения.

Fig. 14. The main types of hydrogeochemical precursor effects are: (a) – bay-shaped, (б) – stepped, (в) – pulsed, (г) – uneven. T is the time of the precursor, τ is the time of the extremum. The dashed line indicates the conditional moment of the earthquake.

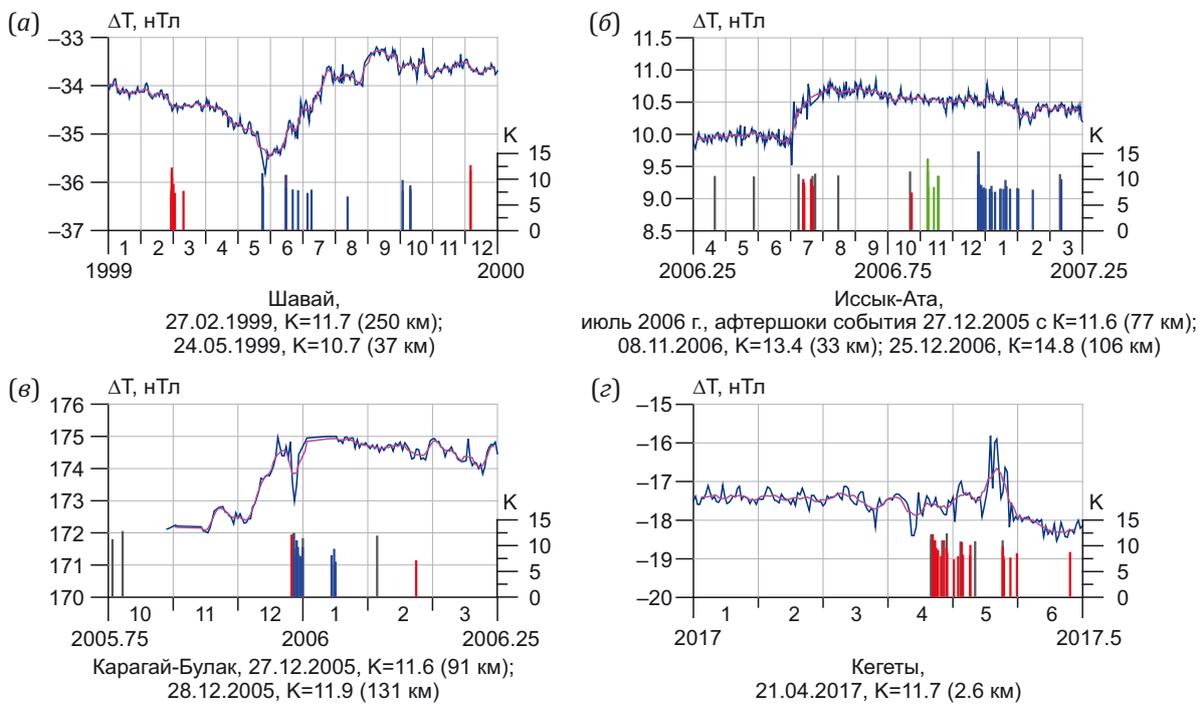


Рис. 15. Примеры наиболее распространенных типов вариаций ΔT с указанием станции наблюдения, даты главного события афтершоковой последовательности (см. табл. 1), его класса и расстояния до станции.

Fig. 15. Examples of the most common types of ΔT variations, with reference to the observation station, date of the main event of the aftershock sequence (see Table. 1), its class and distance to the station.

графиках вариациям ΔT , касающимся землетрясений южнее широты 42° , (см. табл. 1) следует относиться осторожнее: вполне возможно, что они вызваны землетрясениями, эпицентры которых расположены внутри сети наблюдений или в ее ближайших окрестностях.

К дальним относится сильное землетрясение в Китае, произошедшее в уезде Учтурфан в ночь с 22 на 23 января 2024 г. по бишкекскому времени с магнитудой 7.0 и большим количеством афтершоков [Bulletin..., 2024]. Эпицентр располагался примерно в 400 км к юго-востоку от сети геомагнитных наблюдений (рис. 16). Трудно определить, связано ли некоторое снижение значений ΔT в период с ноября по декабрь (даже вплоть до конца января) на одних станциях сети и их повышение на других (рис. 17) с этапом подготовки этого землетрясения, или же оно вызвано активизацией сейсмичности внутри сети мониторинга и в целом на территории БГП, как, например, в декабре 2023 г. (см. рис. 16).

Однако, в отличие от разностных значений ΔT , использование исходных геомагнитных данных с односекундной дискретизацией позволяет обнаружить

на магнитограммах аномальные вариации короткой длительности, которые могут быть связаны с сейсмическими событиями [Soloviev, 2023]. Так, отклик на Учтурфанское землетрясение 22 января 2024 г., сопровождавшееся большим числом афтершоков, можно увидеть в вариациях компонент геомагнитного поля по данным геомагнитной обсерватории Алма-Ата (рис. 18), которая находится на расстоянии около 264 км от эпицентра.

На графиках, представленных на рис. 18, вертикальной пунктирной линией отмечено время первого, более сильного, события (18:09:04 UTC). После землетрясения, спустя несколько секунд, в геомагнитном поле отмечаются аномальные вариации на исходных записях вертикальной компоненты Z (рис. 18, а). Кроме исходных значений геомагнитного поля, также приведен график скорости его изменения в секунду dZ/dt (рис. 18, б). Несмотря на то, что на исходных данных вариаций Z-компоненты выделяются аномальные, отличающиеся от типичного хода вариации, геомагнитный сигнал значительно лучше прослеживается на записях ее производной dZ/dt в виде сильных изолированных всплесков с последующим затуханием. Для

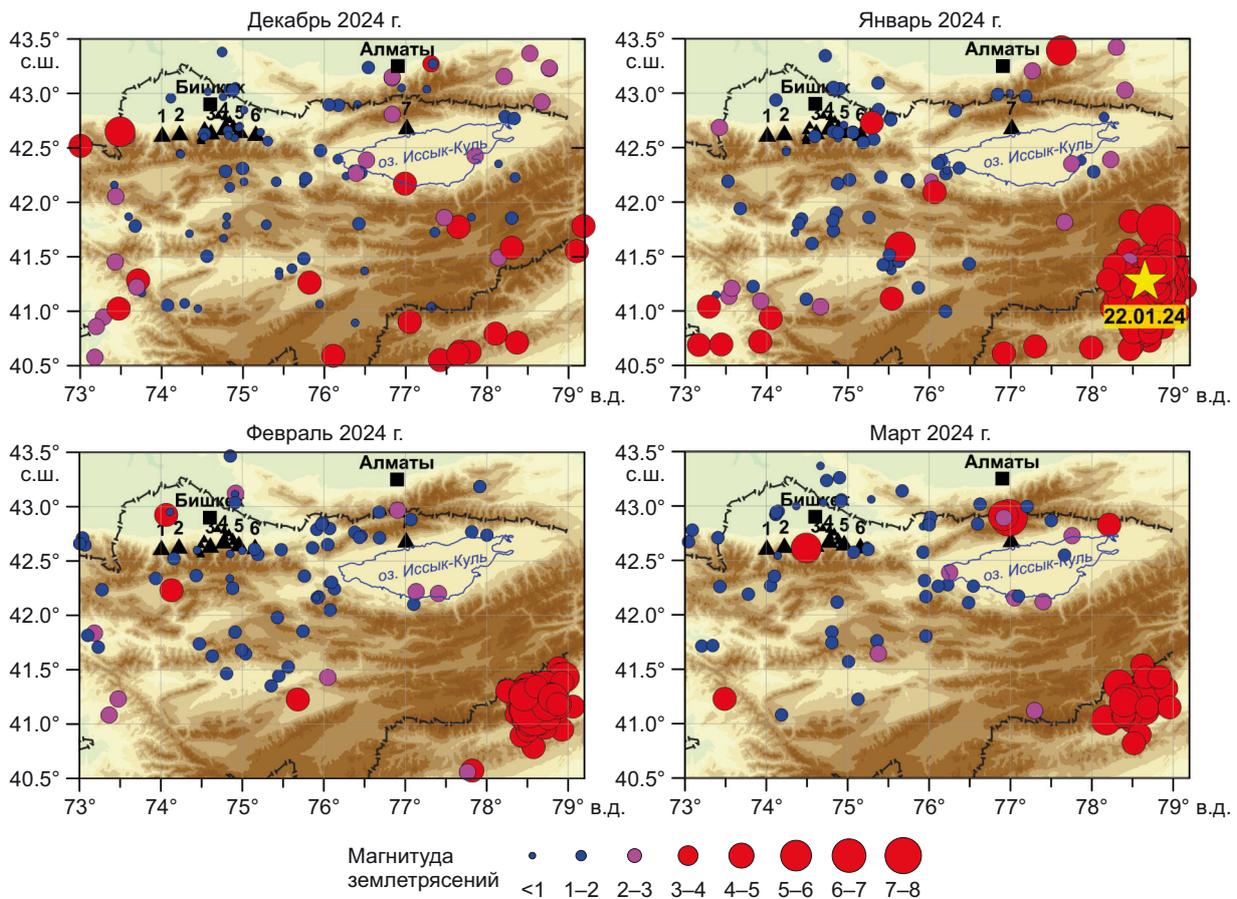


Рис. 16. Распределение сейсмичности в декабре 2023 г. – марте 2024 г. на БГП и в его окрестностях по данным Международного сейсмологического центра (ISC). Звездочкой обозначено главное событие – Учтурфанское землетрясение (22.01.2024 18:09:04 UTC, M=7.0).

Fig. 16. Seismic activity distribution in December 2023 – March 2024 at the BGP and its surroundings from the ISC (International Seismological Centre) data. The asterisk indicates the main event – the Uqturpan earthquake (January 22, 2024, 18:09:04 UTC, M=7.0).

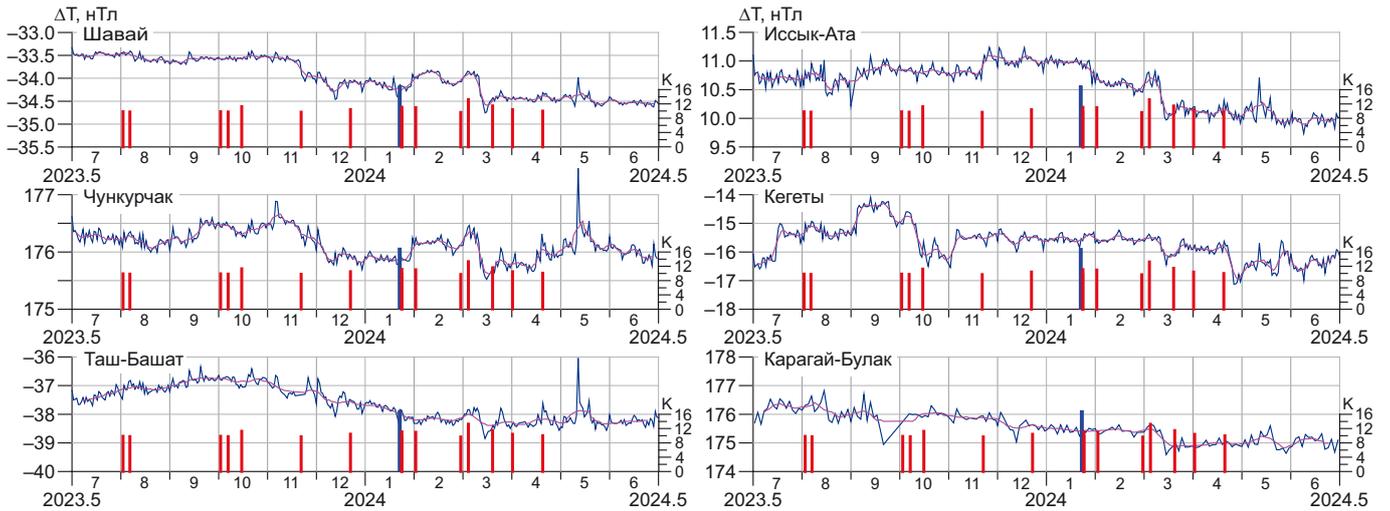


Рис. 17. Фрагменты графиков ΔT с вынесенными на них шкалами землетрясений. Красным цветом выделены события с $K > 10$, синим – Учтурфанское землетрясение.

Fig. 17. Fragments of ΔT graphs, with earthquake scales thereon. Events with $K > 10$ are highlighted in red, the Uqturpan earthquake is marked in blue.

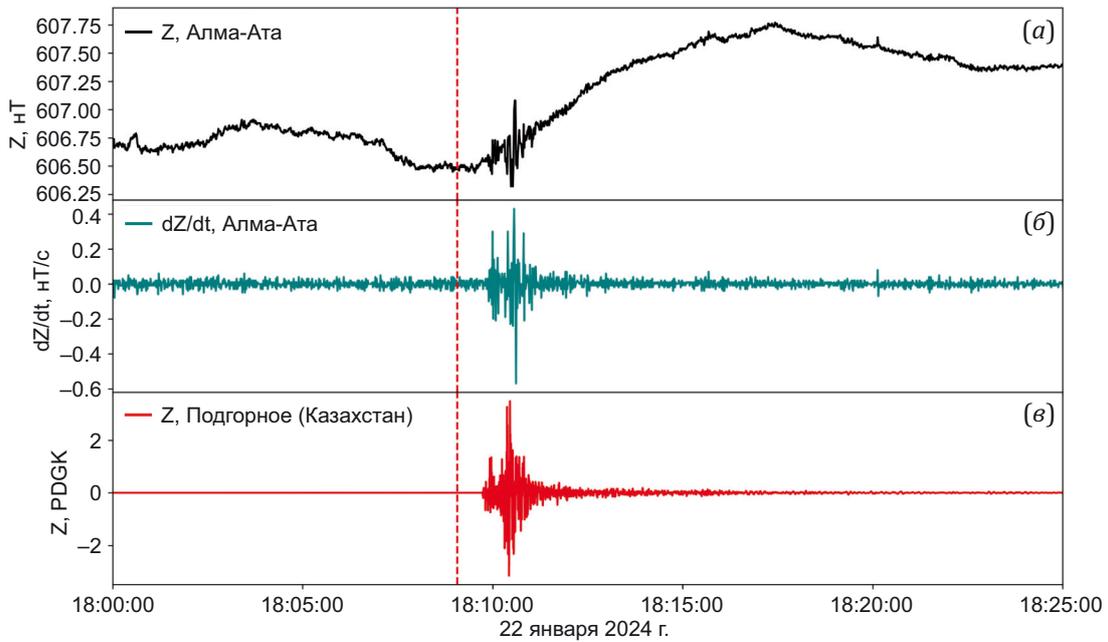


Рис. 18. Вариации Z-компоненты (а) и скорость изменения геомагнитного поля dZ/dt (б) по данным магнитной обсерватории Алма-Ата и волновые формы землетрясения по данным сейсмостанции Подгорное (в). Красная пунктирная линия – время землетрясения (18:09:04 UTC).

Fig. 18. Variations of the Z-component (a) and the rate of change of the geomagnetic field dZ/dt (b) according to the Alma-Ata Observatory, and the earthquake waveforms are drawn according to the Podgornoye seismic station data (c). The red dotted line is the earthquake occurrence time (18:09:04 UTC).

того чтобы понять, связан ли наблюдаемый геомагнитный эффект именно с приходом сейсмической волны, были проанализированы волновые формы рассматриваемого землетрясения (рис. 18, в) по данным сейсмостанции Подгорное, которая наиболее близко расположена к магнитной обсерватории. Видно, что для волновых форм идентично время возникновения и изменения сигнала, их вариации совпадают по

времени с максимальной амплитудой, что подтверждает результат прихода сейсмической волны. Если сравнить время вступления сейсмической волны на сейсмостанции Подгорное в Казахстане и время начала геомагнитного эффекта на магнитной станции Алма-Ата, то разница составит около 10 с. Это связано с тем, что расстояние между этими обсерваториями составляет примерно 208 км, причем расстояние от

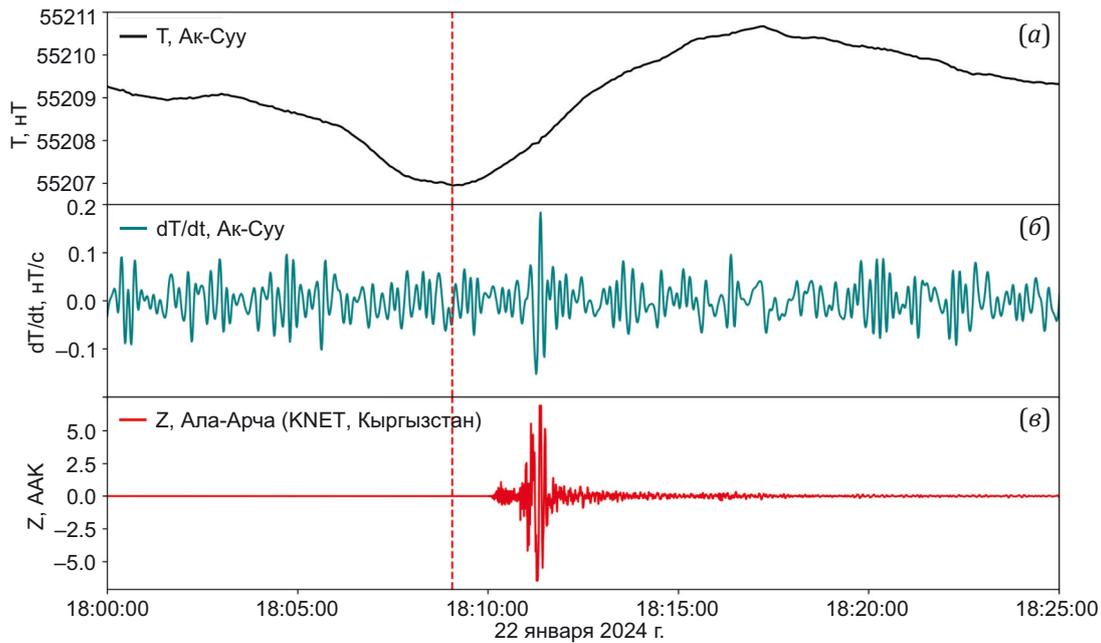


Рис. 19. Вариации полного вектора T (а) и скорость изменения геомагнитного поля dT/dt (б) по данным магнитной станции Ак-Суу и волновые формы землетрясения по данным сейсмостанции Ала-Арча (в). Красная пунктирная линия – время землетрясения (18:09:04 UTC).

Fig. 19. Variations of the total vector T (a) and the rate of change of the geomagnetic field dT/dt (б) according to the Ak-Suu electromagnetic monitoring station data, and the earthquake waveforms are drawn according to the Ala-Archa seismic station data (в). The red dotted line is the earthquake occurrence time (18:09:04 UTC).

эпицентра до сейсмостанции ближе, чем до магнитной станции, поэтому вначале мы видим вступление сейсмической волны, а через несколько секунд – геомагнитный эффект.

Важно отметить, что геомагнитный отклик можно обнаружить только в односекундных данных, тогда как в одноминутных и других наблюдениях, которые регистрируются гораздо дольше, данные сглаживаются и эффекта не наблюдается. Так, например, на базовой станции Ак-Суу сети геомагнитного мониторинга ИС РАН, где круглосуточно ведутся измерения полного вектора геомагнитного поля T с дискретизацией 5 с, отклик на основное событие Учтурфанского землетрясения едва заметен (рис. 19, а), тогда как на графике скорости изменения dT/dt , после вычитания низкочастотного тренда, эффект от землетрясения выражен гораздо заметнее (рис. 19, б). В связи с большой удаленностью станции Ак-Суу от эпицентра Учтурфанского землетрясения (около 400 км) отклик в магнитограмме обнаруживается позднее, чем на станции Алма-Ата, расположенной на гораздо меньшем расстоянии от эпицентра землетрясения (270 км).

Для подтверждения связи наблюдаемого геомагнитного отклика с рассматриваемым землетрясением были проанализированы волновые формы Учтурфанского события по данным сейсмостанции Ала-Арча (рис. 19, в), которая входит в сейсмологическую сеть KNET и располагается на расстоянии около 40 км от станции Ак-Суу. Видно, что время вступления сейсмической волны на сейсмостанции фиксируется раньше,

чем на магнитной обсерватории, что объясняется их различной удаленностью от эпицентра события.

Согласно данным Аналитического центра по геомагнетизму и космическому магнетизму (Киото, Япония, <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>), средние значения DST-индекса в период с 20 по 24 февраля 2024 г. составляли от -15 до 14 нТл, что свидетельствует об отсутствии сильных магнитных возмущений в это время. Это дает основание интерпретировать аномальные вариации геомагнитного поля в период землетрясений 22 января как отклик на них. Для рассмотренных событий, произошедших ранее Учтурфанского землетрясения, средние значения DST-индекса приведены в табл. 3.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитное поле оказывается весьма чувствительным к изменениям состояния геосреды, связанным, в том числе, с подготовкой и реализацией землетрясений. Имеется успешный опыт использования метода магнитометрии с регистрацией полного вектора магнитного поля T , а также разности ΔT на геодинамических полигонах Узбекистана с целью поиска предвестников землетрясений. Так, аномальные изменения геомагнитного поля ΔT на станции Шурчи послужили предвестниками глубоких Афганских землетрясений 12 марта с $M=5.6$, 5 апреля с $M=6.4$ и 14 апреля с $M=4.7$ в 2004 г., а в 2008 г. выявлено аномальное изменение поля ΔT на станции Хумсан относительно обсерватории Янгибазар, связанное с тремя землетрясениями:

$M=4.5$ (Кыргызстан), $M=4.7$ (Ташкентское, Узбекистан), $M=6.6$ (Нура, Кыргызстан). Все три землетрясения произошли вокруг станции Хумсан, на вариациях геомагнитного поля которого отразились в виде одной бухтообразной аномалии, свидетельствующей об общем напряженном состоянии северо-восточной части исследуемого региона [Abdullabekov et al., 2009].

Перед авторами настоящей статьи не стояла задача поиска предвестников землетрясений. Целью данной работы являлось исследование аномальных вариаций геомагнитного поля, сопровождающих землетрясения $K \geq 10$ с афтершоковыми последовательностями (см. табл. 1).

Вариации геомагнитного поля от такого рода землетрясений бывают более продолжительными и визуально более выраженными на временных рядах ΔT , чем от одиночных событий 10-го класса и выше. При этом имеет значение энергетический класс главного события, количество реализованных в первые часы, сутки афтершоков.

По мере реализации афтершоков их энергетический класс снижается и вариации ΔT сходят на нет. При наличии в афтершоковой последовательности событий, сравнимых по классу с классом главного события, вариации возобновляются, причем в некоторых случаях они приводят к резкому росту поля с образованием «ступени», т.е. установлению значений ΔT на новом, более высоком, уровне в течение довольно продолжительного времени (как например при реализации в октябре 2005 г. второго этапа афтершоковой деятельности землетрясения 07.07.2005 г. ($K=10.9$). Происходящие в этот период другие события (08.11.06 с $K=13.4$, 25.12.06 с $K=14.8$) остаются практически незамеченными на графике ΔT (см. рис. 10).

Предшествующий реализации главного события и его афтершоков период снижения на временных рядах значений ΔT с образованием минимума (см. рис. 10, вариация в виде бухты на станции Чонкурчак перед Луговским землетрясением 22.05.2003 г. с $K=14.3$) может рассматриваться как предвестник землетрясения. Сам момент землетрясения приходится на восходящую ветвь графика ΔT .

Реакция геомагнитного поля на рассматриваемые в табл. 1 события с афтершоковыми последовательностями неоднозначна. Возможные причины этого описаны выше. Синхронность в поведении ΔT одновременно на всех станциях сети применительно к какому-либо событию – явление довольно редкое: в качестве примера можно привести серию Кегетинских землетрясений, произошедших 21.04.2017 г. в восточной части сети геомагнитного мониторинга, когда накануне землетрясения на временных рядах для шести станций из семи наблюдалось бухтообразное снижение значений ΔT . Однако на самой ближней к эпицентру станции Кегеты, которая расположена всего в 2.6 км от него, предсейсмические отклики на землетрясения отсутствовали. Почти аналогичная ситуация сложилась накануне Луговского землетрясения 22.05.2003 г. с $K=14.3$: на

самой ближней к эпицентру главного события станции наблюдения Шавай вариации ΔT оказались минимальными.

Немаловажным, на взгляд авторов, является вопрос отражения на временных рядах дальних землетрясений (см. рис. 6, южнее 42-й широты). Визуально их практически нельзя выделить на графиках ΔT , а если эффект от этих событий все же наблюдается, тут же возникает вопрос: а не связан ли он с подготовкой и реализацией более близких к измерительным станциям сети событий 9–10-го класса и выше или даже роя слабых по энергетическому классу землетрясений?

Землетрясения далеко за пределами БГП, как, например, произошедшее на территории Китая, примерно в 400 км к юго-востоку от сети геомагнитных наблюдений ИС РАН сильное Учтурфанское землетрясение (22.01.2024 г. 18:09:04 $M=7.0$), сопровождавшееся большим количеством афтершоков, не нашли должного отражения на временных рядах ΔT стационарных пунктов ИС РАН. Однако отклик этого землетрясения на исходных записях геомагнитного поля проявился в односекундных данных в виде высокочастотных колебаний. Более отчетливо геомагнитный эффект стал заметен на графиках производных и связан с приходом сейсмических волн, что подтверждается записями волновых форм, зарегистрированных на ближайших к магнитным обсерваториям сейсмических станциях.

На шкалах землетрясений, вынесенных на графики временных рядов для всех станций сети мониторинга ИС РАН, довольно часто встречаются одиночные или с малым числом афтершоков события с $K \geq 10$ (на графиках они выделены серым цветом). Они фиксируются довольно узкими и непродолжительными по времени вариациями ΔT в виде импульсов, амплитуда которых порой сопоставима с откликами от рассматриваемых в статье главных событий афтершоковых последовательностей, и вполне возможно, что в этих откликах присутствует и «вклад» от упомянутых одиночных землетрясений.

Процесс сопоставления вариаций геомагнитного поля на временных рядах ΔT с сейсмическими событиями порой оказывается весьма затруднительным. Необходим более детальный анализ как вариаций геомагнитного поля, так и сейсмической обстановки в пределах рассматриваемой территории.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведено сопоставление данных геомагнитного мониторинга Научной станции РАН, полученных с помощью высокоточных магнитовариационных станций (МВ-07, POS-1) на стационарных пунктах сети геомагнитного мониторинга, с данными каталога, созданного на базе сейсмологической сети KNET. В качестве объекта исследования были выбраны землетрясения (21 событие), которые сопровождались десятью и более афтершоками разных классов.

Вариациями разности модуля полного вектора геомагнитного поля ΔT фиксировались преимущественно

события, эпицентры которых располагались в пределах сети мониторинга и ближайших его окрестностях, более удаленные от сети события не находят своего отражения во временных рядах или выражены слабо.

Существуют различия в протекании вариаций геомагнитного поля на станциях геомагнитного мониторинга. Относительно одного и того же землетрясения с афтершоковой последовательностью наблюдаемые на разных станциях сети вариации не синхронны. Это может быть обусловлено расположением конкретной станции относительно источника деформационного процесса, различием физических, в том числе и магнитных, свойств пород, подстилающих конкретную геомагнитную станцию, разным геологическим строением разреза под каждой из станций и т.д. Синхронными можно считать вариации ΔT , зарегистрированные в период подготовки и реализации серии Кегетинских землетрясений (21.04.2017 г., $K=11.7$), а также Луговского землетрясения (22.05.2003 г., $K=14.3$). Наблюдаемые в процессе исследования вариации геомагнитного поля применительно к отдельно взятому событию на разных станциях сети могут иметь противоположный знак, амплитуду, продолжительность и форму (морфологию). Что касается последних, то наиболее часто аномальные изменения ΔT представлены в виде бухты, ступени, реже – в виде импульсов и скачков.

Наиболее ярко главные события и их афтершоки (см. табл. 1) проявились в период с 2003 по 2007 г., характеризующийся повышенной сейсмической активностью, о чем свидетельствуют представленные для всех станций сети фрагменты временных рядов разности ΔT , вычисленной относительно базовой станции Ак-Суу.

В период с весны 2017 до 2024 г. не было выявлено ни одного сейсмического события с $K \geq 10$, которое сопровождалось бы большим количеством афтершоков. Однако произошедшее в 2024 г. на границе Кыргызстана с Китаем сильное землетрясение, сопровождавшееся большим количеством афтершоков (уезд Учтурфан, 22.01.2024 г. 18:09:04 UTC, $M=7.0$), не нашло должного отражения на 20-секундных измерениях разности модуля полного вектора магнитного поля ΔT , но, хотя и слабо, все же проявилось на 5-секундных измерениях полного вектора T на базовой станции Ак-Суу, расположенной на расстоянии около 400 км к северу-западу от очага землетрясения. Важно отметить, что использование данных с односекундной дискретизацией позволило обнаружить на магнитограммах станции Алма-Ата аномальные вариации короткой длительности, связанные с упомянутым землетрясением. Проведенный анализ данных по Учтурфанскому землетрясению является дополнительным подтверждением потребности в расширении сети односекундных наблюдений, необходимых для изучения влияния сейсмических событий на вариации геомагнитного поля.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам статьи, сотрудникам Научной станции РАН за помощь в

подготовке материалов, а также заведующему лабораторией геомагнитных исследований Института ионосферы г. Алматы А.Б. Андрееву за предоставленные геомагнитные данные.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

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

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

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

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

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

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abdullabekov K.N., Muminov M.Yu., Tuichiev A.I., 2009. Geomagnetic Monitoring of Seismic Processes in Uzbekistan. In: Geodynamics. Deep Structure. Thermal Field of the Earth. Interpretation of Geophysical Fields. Proceedings of the Fifth Scientific Readings in Memory of Yu.P. Bulashevich (July 06–10, 2009). IGG UB RAS, Ekaterinburg, p. 4–6 (in Russian) [Абдуллабеков К.Н., Муминов М.Ю., Туйчиев А.И. Геомагнитный мониторинг сейсмической ситуации в Узбекистане // Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей: Материалы Пятых научных чтений памяти Ю.П. Булашевича (6–10 июля 2009 г.). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009. С. 4–6].

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., Мухамедеева 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>.

Bulletin of the International Seismological Centre Catalogue Search, 2024. Available from: <https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/> (Last Accessed August 27, 2024).

Hayakawa M., Hattori K., Ohta K., 2007. Monitoring of ULF (Ultra-Low-Frequency) Geomagnetic Variation Associated with Earthquakes. Sensors 7 (7), 1108–1122. <https://doi.org/10.3390/s7071108>.

Imashev S.A., Lazareva E.A., 2022. Program for Removing Emissions from Time Series of the Geomagnetic Field Variations Using Hampel Filter MagHampelOutlierCut. Software Registration Certificate № RU 2022684573 of November 28, 2022. ROSPATENT, Moscow (in Russian) [Имашев С.А., Лазарева Е.А. Программа удаления выбросов во временных рядах вариаций величины геомагнитного поля

на основе фильтра Хампеля MagHampelOutlierCut: Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2022684573 от 28.11.2022 г. М.: РОСПАТЕНТ, 2022].

Lutikov A.I., Dontsova G.Yu., Rodina S.N., 2017. Time and Energetic Parameters of the Aftershock Process for the Earthquakes in the Caucasus and Adjacent Areas. *Geophysical Research* 18 (1), 20–36 (in Russian) [Лутиков А.И., Донцова Г.Ю., Родина С.Н. Временные и энергетические параметры афтершокового процесса землетрясений Кавказа и сопредельных территорий // Геофизические исследования. 2017. Т. 18. № 1. С. 20–36]. <https://doi.org/10.21455/gr2017.1-2>.

Muhamadeeva V.A., Sycheva N.A., 2018. Aftershock Processes Supporting Moderate and Weak Earthquakes in the Area of the Bishkek Geodynamic Test Site and in Its Vicinity. *Geosystems of Transition Zones* 2 (3), 165–180 (in Russian) [Мухамадеева В.А., Сычева Н.А. Об афтершоковых процессах, сопровождающих умеренные и слабые землетрясения на территории Бишкекского геодинамического полигона и в его окрестностях // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 3. С. 165–180]. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.165-180>.

Mukhamadeeva V.A., 2021. Anomalous Modulations of Electromagnetic Field During Increased Seismic Activity. In: *Problems of Geodynamics and Geoecology of Intracontinental Orogens. Proceedings of the VIII International Symposium (June 28 – July 2, 2021, Bishkek)*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 929, 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/929/1/012024>.

Pogrebnoi V.N., Grebennikova V.V., 2015. Features of Geophysical Fields in the Junction Zone of the Chuya Depression and Its Mountain Frame. In: *Problems of Geodynamics and Geoecology of Inland Orogens. Proceedings of the VI International Symposium (June 23–29, 2014)*. Research Station RAS, Bishkek, p. 95–100 (in Russian) [Погребной В.Н., Гребенникова В.В. Особенности геофизических полей в зоне сочленения Чуйской впадины и ее горного обрамления // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы докладов VI Международного симпозиума (23–29 июня 2014 г.). Бишкек: НС РАН, 2015. С. 95–100].

Rebetsky Yu.L., Kuzikov S.I., 2016. Active Faults of the Northern Tien Shan: Tectonophysical Zoning of Seismic Risk. *Russian Geology and Geophysics* 57 (6), 967–983. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.05.004>.

Report on the Results of Experimental-Methodological Prognostic Observations in Seismogenic Zones of Central Asia in 1991–1994, 1994. Funds of the Research Station RAS, Bishkek, p. 155–166 (in Russian) [Отчет о результатах проведения опытно-методических прогностических наблюдений в пределах сейсмогенных зон Средней Азии в 1991–1994 гг. Бишкек: Фонды НС РАН, 1994. С. 155–166].

Semenov R.M., Smekalin O.P., 2011. The Large Earthquake of 27 August 2008 in Lake Baikal and Its Precursors. *Russian Geology and Geophysics* 52 (4), 405–410. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.03.003>.

Soloviev A.A., 2023. Geomagnetic Effect of the Earthquakes with Mw=7.5–7.8 in Turkey on February 6, 2023. *Doklady Earth Sciences* 511, 578–584. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23600731>.

Spivak A.A., Riabova S.A., 2019. The Geomagnetic Effect of Earthquakes. *Doklady Earth Sciences* 488, 1107–1110. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19090216>.

Sycheva N.A., Muhamadeeva V.A., 2020. Aftershock Sequences and Earthquakes Dynamic Parameters on the Bishkek Geodynamic Test Site. In: *Influence of External Fields on Seismic Regime and Monitoring of Their Manifestations. Proceedings of the International Jubilee Conference (July 3–7, 2018)*. Research Station RAS, Bishkek, p. 159–165 (in Russian) [Сычева Н.А., Мухамадеева В.А. Афтершоковые последовательности и динамические параметры землетрясений на территории Бишкекского геодинамического полигона // Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений: Материалы Международной юбилейной конференции (3–7 июля 2018 г.). Бишкек: НС РАН, 2020. С. 159–165].

Velikhov E.P., Zeigarnik V.A. (Eds), 1993. *Reflection of Geodynamical Processes in Geophysical Fields*. Nauka, Moscow, 158 p. (in Russian) [Проявление геодинамических процессов в геофизических полях / Ред. Е.П. Велихов, В.А. Зейгарник. М.: Наука, 1993. 158 с.].