

УДК 550.380.25

Лазарева Е. А.

Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке,
г. Бишкек, Кыргызстан

АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЕРИОД ТУРЕЦКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ФЕВРАЛЕ 2023 ГОДА

Аннотация. В статье рассматриваются примеры аномальных вариаций геомагнитного поля, которые наблюдались во время землетрясений, магнитудой $M_w = 7.5-7.8$, произошедших 6 февраля 2023 г. в Турции. В качестве исходных данных были использованы 1-секундные измерения величины геомагнитного поля по четырём обсерваториям международной сети INTERMAGNET. Проведён анализ изменения основных компонент геомагнитного поля и их производных по времени в зависимости от расстояния между обсерваторией и эпицентром землетрясения. Отклики основных двух землетрясений 6 февраля 2023 года проявляются в виде высокочастотных колебаний в исходных записях X , Y , Z компонент. Более отчётливо геомагнитный эффект проявляется на графиках производных dX/dt , dY/dt , dZ/dt , при этом наибольший отклик проявляется на записях горизонтальных компонент. Рассмотренные эффекты землетрясений возникают и пропадают синхронно с приходом сейсмической волны, что подтверждается записями волновых форм с ближайших к магнитным обсерваториям сейсмических станций.

Ключевые слова: геомагнитное поле, данные, землетрясение, магнитуда, геомагнитный эффект, вариация

ТҮРКИЯДА 2023-ЖЫЛДЫН ФЕВРАЛЬ АЙЫНДА БОЛГОН ЖЕР ТИТИРӨӨЛӨР УЧУРУНДА ГЕОМАГНИТТИК ТАЛААНЫН ВАРИАЦИЯЛАРЫНЫН АНАЛИЗИ

Кыскача мазмуну. Макалада, Түркияда 2023-жылдын 6-февраль күнү магнитудасы $M_w = 7.5-7.8$ болгон жер титирөө учурунда байкалган геомагниттик талаанын аномалдуу вариацияларынын мисалдары каралат. Баштапкы маалыматтар катары INTERMAGNET эл аралык тармагынын төрт обсерваториясы боюнча геомагниттик талаанын 1-секундалык өлчөөлөрү колдонулган. Геомагниттик талаанын негизги компонентинин жана алардын туундуларынын обсерватория менен жер титирөөнүн эпицентринин ортосундагы аралыкка жараша өзгөрүү анализи жүргүзүлдү. 2023-жылдын 6-февралындагы негизги эки жер титирөө X , Y , Z компонентинин баштапкы жазууларында жогорку жыштыктагы термелүүлөр түрүндө көрүнөт. Тагыраак айтканда, геомагниттик эффект dX/dt , dY/dt , dZ/dt туундуларынын графиктеринде көрүнүп, горизонталдуу компонент жазууларында эң чоң амплитуда менен коштолгон. Жер титирөөлөрдүн таасири сейсмикалык толкундун келиши менен синхрондуу түрдө пайда болду, муну магниттик обсерваторияларга жакын сейсмикалык станциялардан алынган толкун формаларынын жазуулары тастыктайт.

Негизги сөздөр: геомагниттик талаа, маалымат, жер титирөө, магнитуда, геомагниттик эффект, вариация

GEOMAGNETIC FIELD VARIATIONS ANALYSIS DURING THE TURKISH EARTHQUAKES IN FEBRUARY 2023

Abstract. Examples of the geomagnetic field anomalous variations that occurred because of earthquakes on February 6, 2023, with magnitude $M_w=7.5-7.8$ in Turkey are considered in the paper. As initial data international INTERMAGNET network 1-second geomagnetic field measurements from four observatories were used. The changes in the geomagnetic field main components and their time derivatives are analyzed depending on the distances between the observatory and the earthquake epicenter. The responses of the main two earthquakes on February

6, 2023, are presented in the form of high-frequency oscillations in the initial records of the X, Y, Z components. The rates of change dX/dt , dY/dt , dZ/dt graphs reflected geomagnetic effect more clearly, particularly horizontal component records. The considered earthquake effects arise and disappear synchronously with a seismic wave that confirmed by the wave form records from seismic stations closest to magnetic observatories.

Keywords: geomagnetic field, data, earthquake, magnitude, geomagnetic effect, variation

Введение. Несмотря на детальное изучение сейсмичности в пределах стыка крупных тектонических плит, влияние землетрясений и связанных с ними процессов в литосфере на геомагнитное поле всё ещё слабо изучено. Основные трудности в изучении геомагнитных эффектов, вызванных сейсмическими событиями, связаны с недостаточным объёмом односекундных и более высокочастотных наблюдений геомагнитного поля, а также с их недостаточным географическим охватом. Использование данных с 1-секундной дискретизацией позволяет обнаружить на магнитограммах аномальные вариации короткой длительности, которые могут быть связаны с сейсмическими событиями [1].

Данные. Серия разрушительных землетрясений в Турции произошла в период с 6 по 20 февраля 2023 года. Самые сильные события характеризовались магнитудой M_w от 6.0 до 7.8 (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>).

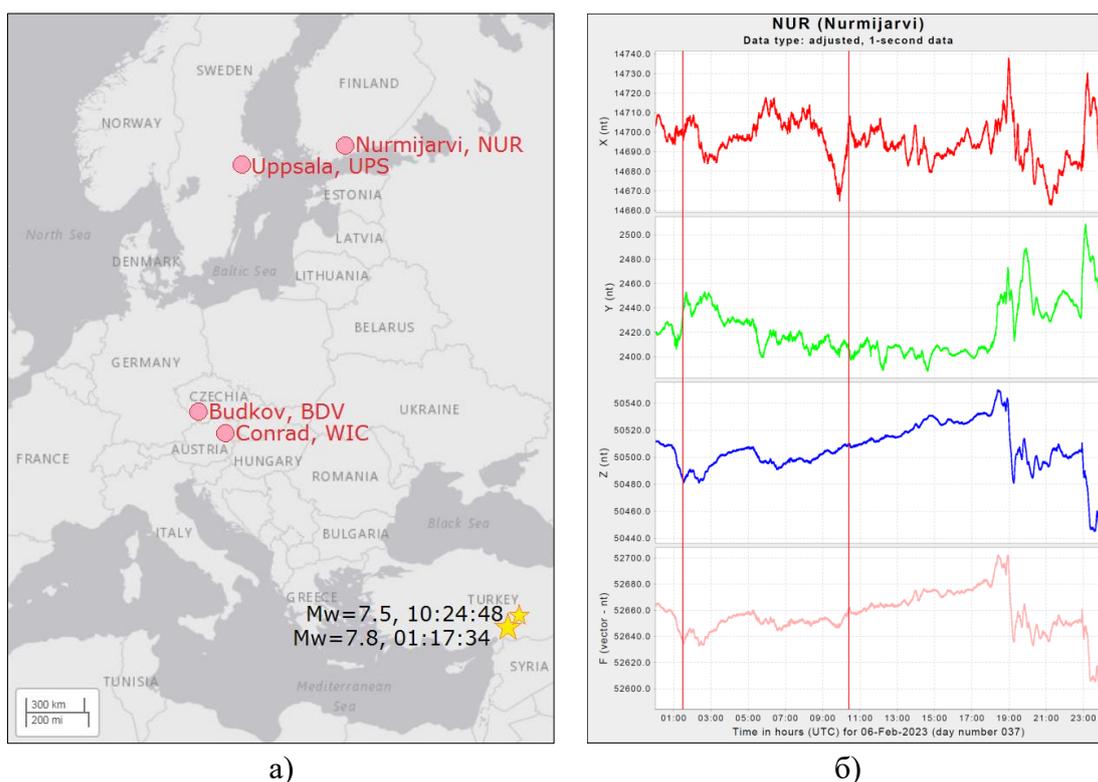


Рисунок 1. а) Карта выбранных обсерваторий сети INTERMAGNET (красные метки) и эпицентры землетрясений (жёлтые метки). б) Магнитограммы компонент геомагнитного поля на примере обсерватории Nurmijarvi (NUR), Finland, 6 февраля 2023 г. Момент основных толчков обозначен красной вертикальной линией.

Эта серия подземных толчков сопровождалась рядом различных геодинамических эффектов, отражающихся, например, в вариациях полного электронного содержания ионосферы [2], в вариациях электрического поля и других геофизических полей [3]. Целью данного исследования является изучение геомагнитного эффекта, связанного с указанными

землетрясениями. Для этого были выбраны данные станций, входящих в состав Международной сети магнитных обсерваторий INTERMAGNET (<https://intermagnet.org/>), в частности: Conrad (WIC, Austria), Budkov (BDV, Czech Republic), Nurmijarvi (NUR, Finland), Uppsala (UPS, Sweden). Все рассматриваемые обсерватории удалены от эпицентров землетрясений на расстояние более 2000 км, располагаются в северо-западном направлении от очагов событий (рисунок 1 (а)). В таблице 1 приведены расстояния (км) от выбранных обсерваторий до источников землетрясений с $M_w=7.5$ и $M_w=7.8$. Пример исходных данных представлен на рисунке 1 (б).

Таблица 1. Расстояния (км) от рассматриваемых обсерваторий до эпицентров землетрясений.

Обсерватория	Austria, Conrad (WIC)	Czech Republic, Budkov (BDV)	Finland, Nurmijarvi (NUR)	Sweden, Uppsala (UPS)
Расстояние (км) до источника землетрясения, магнитуда $M_w = 7.5$.	2049	2226	2653	2810
Расстояние (км) до источника землетрясения, магнитудой $M_w = 7.8$.	2093	2273	2733	2884

Согласно данным аналитического центра по геомагнетизму и космическому магнетизму (Kyoto, Japan), средние значения DST-индекса в период с 4 по 8 февраля 2023 г. составляли в среднем от -23 нТл до 11 нТл, что свидетельствует об отсутствии сильных магнитных возмущений в это время (https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/202302/index.html), что даёт основание интерпретировать аномальные вариации геомагнитного поля в периоды землетрясений как сейсмоэлектрический эффект.

Чтобы оценить геомагнитный эффект рассматриваемых землетрясений, были проанализированы данные односекундных магнитограмм трёх составляющих геомагнитного поля (северной X , восточной Y и вертикальной Z). Вариации компонент магнитного поля Земли включают в себя как низкочастотные, высокоамплитудные составляющие, так и высокочастотные колебания, зачастую малой амплитуды, что требует применения специальных процедур для их выделения [4]. Одним из методов выделения высокочастотных вариаций на фоне медленных изменений является расчёт производной от сигнала [5]. Соответствующие скорости изменения хода геомагнитного поля dX/dt , dY/dt , dZ/dt были рассчитаны по формулам:

$$\begin{aligned} dX(i) &= (X(i+1) - X(i-1)) / 2 \\ dY(i) &= (Y(i+1) - Y(i-1)) / 2, \\ dZ(i) &= (Z(i+1) - Z(i-1)) / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

где X , Y , Z – составляющие вектора магнитной индукции, i – текущий отсчет времени.

Для того чтобы понять, связан ли наблюдаемый геомагнитный эффект с приходом сейсмической волны, были проанализированы волновые формы рассматриваемых землетрясений по станциям, которые наиболее близко расположены к приведённым магнитным обсерваториям (<https://www.orfeus-eu.org/>). Волновые формы событий были зафиксированы на следующих сейсмических станциях: CSNA (Conrad Observatorium, Schwebeschacht, Austria), KHC (Kasperske Hory, Czech Republic), MEF (Station Metsahovi, Finland), BREU (Bredtraesk, Bjurholm, Sweden).

Результаты. Рассмотрим геомагнитные эффекты приведённых землетрясений и время их появления в зависимости от расстояния до сейсмического источника. Согласно данным геологической службы USGS, первый толчок, мощностью $M_w = 7.8$, произошёл 6 февраля 2023 года в 01:17:34 UTC, на глубине около 10 км. Примерно через девять часов, в 10:24:50 UTC произошло второе мощное землетрясение с $M_w = 7.5$, его глубина составляла около 15 км (<https://earthquake.usgs.gov/>).

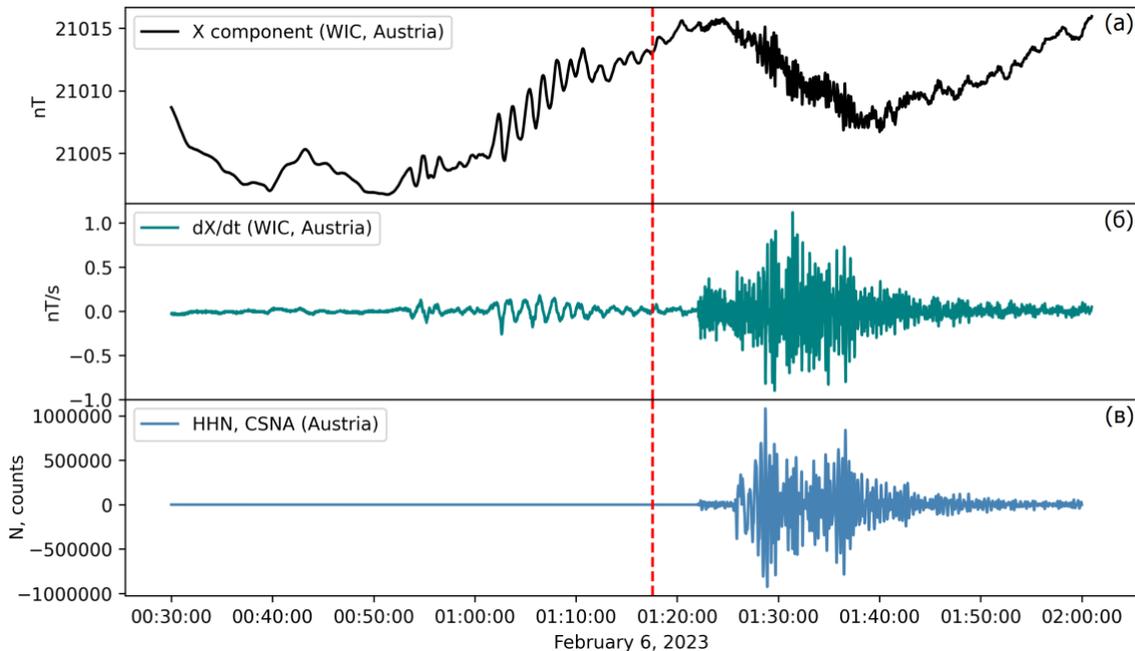


Рисунок 2. Вариации X -компоненты (а) и скорость изменения геомагнитного поля dX/dt (б) по данным магнитной обсерватории Conrad, Austria. Волновые формы землетрясения по данным сейсмостанции CSNA, Austria (в). Красная пунктирная линия – время первого землетрясения с $M_w=7.8$ – 01:17:34 (UTC).

На рисунке 2 и рисунке 3 представлены вариации компоненты X (чёрным цветом), скорость изменения геомагнитного поля dX/dt (зелёным цветом), а также волновые формы первого события (синим цветом) по данным обсерваторий, которые наиболее близко расположены к очагу землетрясения: WIC (рисунок 2 (а), (б)), CSNA (рисунок 2 (в)), BDV (рисунок 3 (а), (б)), КНС (рисунок 3 (в)). Вертикальной пунктирной линией отмечено время события.

Несмотря на то, что на исходных данных вариаций X -компоненты выделяются аномальные, отличающиеся от типичного хода вариации (рисунок 2 (а), 3 (а)), геомагнитный сигнал значительно лучше прослеживается на записях скорости изменения геомагнитного поля dX/dt (рисунок 2 (б), 3 (б)) в виде сильных изолированных всплесков с последующим затуханием. Волновые формы (рисунок 2 (в), 3 (в)) совпадают по времени с максимальной амплитудой, что подтверждает результат прихода сейсмической волны.

На магнитных обсерваториях NUR (рисунок 4 (а), (б)) и UPS (рисунок 5 (а), (б)), несмотря на гораздо более удалённое расстояние от очага землетрясения, геомагнитный эффект выделяется также хорошо, как и на предыдущих станциях. Для волновых форм, зафиксированных на ближайших к магнитным обсерваториям сейсмостанциях MEF (рисунок 4 (в)) и BREU (рисунок 5 (в)), идентично время возникновения и изменения сигнала.

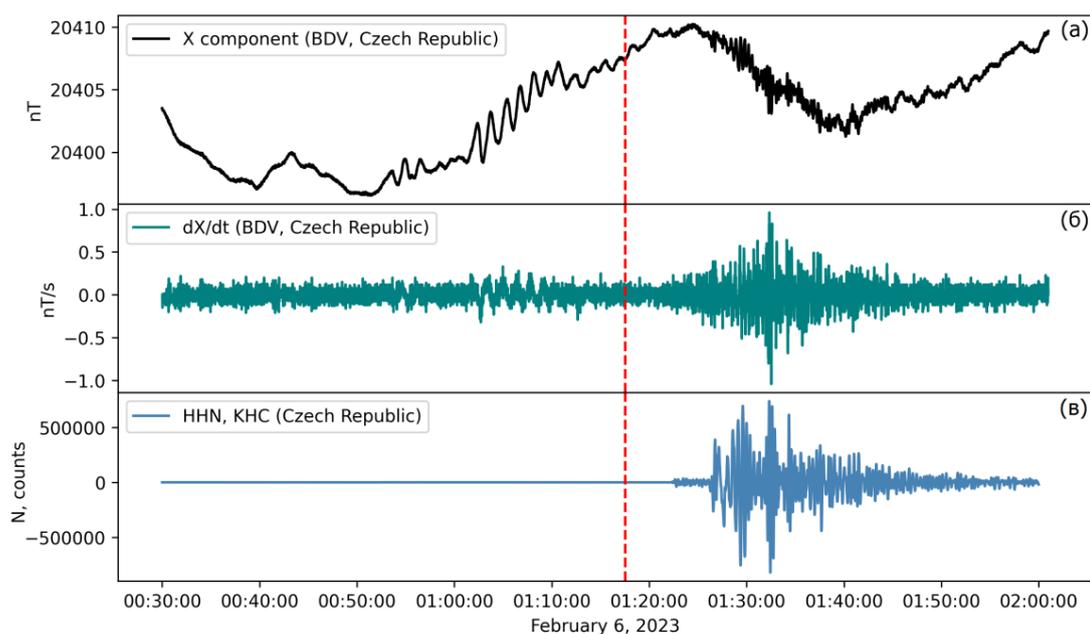


Рисунок 3. Вариации X -компоненты (а) и скорость изменения геомагнитного поля dX/dt (б) по данным магнитной обсерватории Budkov, Czech Republic. Волновые формы землетрясения по данным сейсмостанции КНС, Czech Republic (в). Красная пунктирная линия – время первого землетрясения с $M_w=7.8$ – 01:17:34 (UTC).

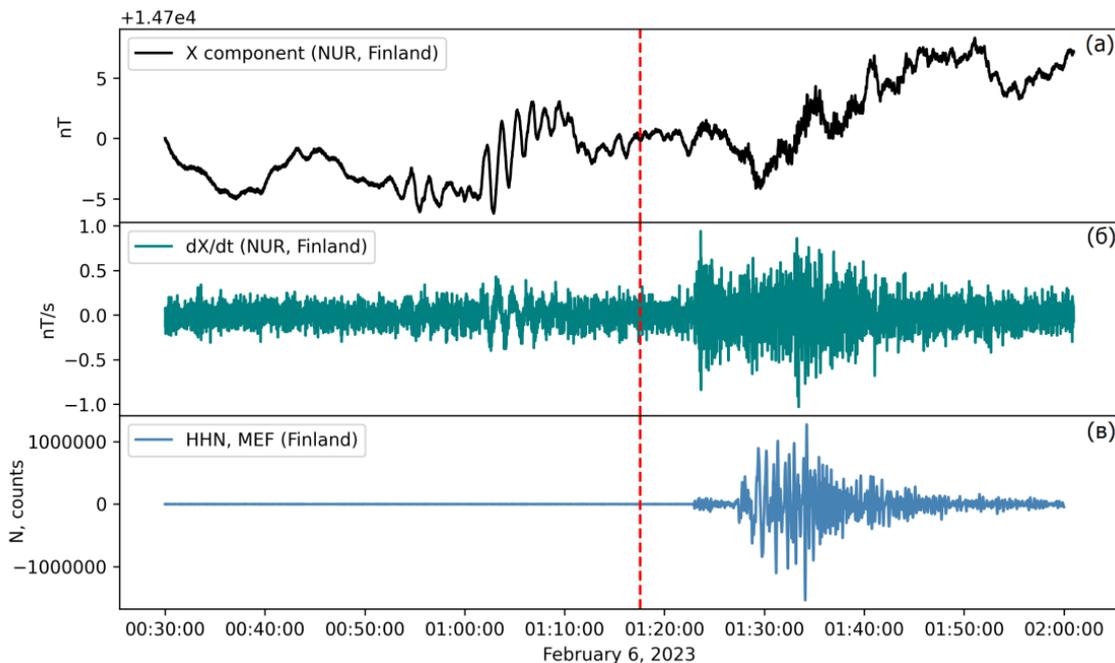


Рисунок 4. Вариации X -компоненты (а) и скорость изменения геомагнитного поля dX/dt (б) по данным магнитной обсерватории Nurmijarvi, Finland. Волновые формы землетрясения по данным сейсмостанции MEF, Finland (в). Красная пунктирная линия – время первого землетрясения с $M_w=7.8$ – 01:17:34 (UTC).

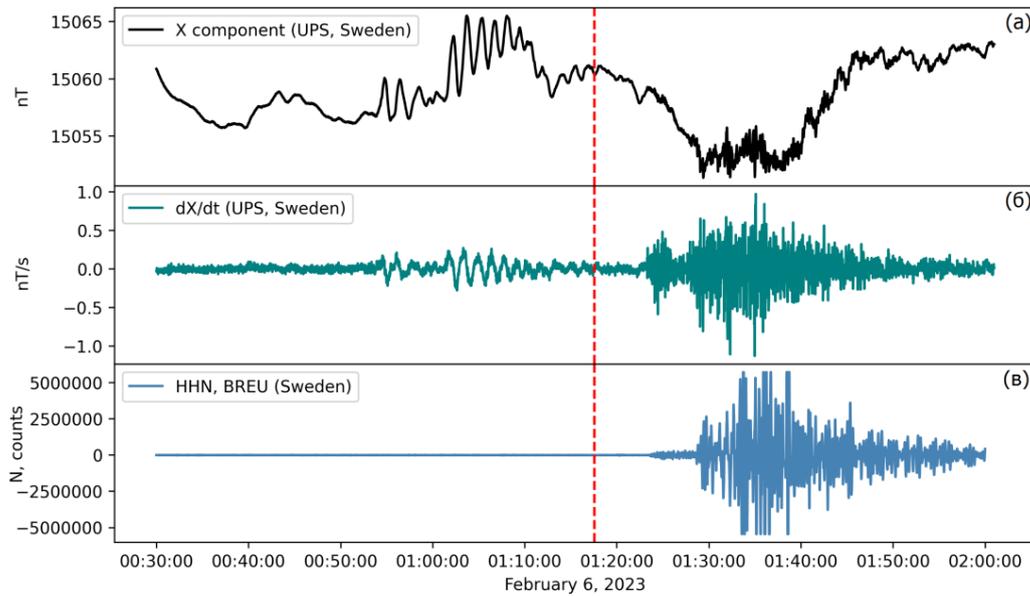


Рисунок 5. Вариации X -компоненты (а) и скорость изменения геомагнитного поля dX/dt (б) по данным магнитной обсерватории Uppsala, Sweden. Волновые формы землетрясения по данным сейсмостанции BREU, Sweden (в). Красная пунктирная линия – время первого землетрясения с $M_w=7.8$ – 01:17:34 (UTC).

Изменение вариаций Y и Z -компонент на графиках геомагнитного поля рассмотрим совместно со следующим крупным землетрясением с магнитудой $M_w=7.5$, которое произошло в 10:24:50 UTC (рисунок 6). Время первого и второго землетрясений отмечено вертикальной пунктирной линией. Наибольшая амплитуда сигнала достигается на записях dX/dt и dY/dt . На обсерватории WIC (рисунок 6 (а)), которая является ближайшей к эпицентрам, наибольшие амплитуды вариаций X -компоненты отмечаются после первого события и изменяются от -0.9 до 1.12 нТл/с; для Y -компоненты амплитуда немного больше после второго события и изменяется от -1.33 до 1.34 нТл/с; для Z -компоненты амплитуда наименьшая и изменяется от -0.49 до 0.44 нТл/с после обоих землетрясений. На обсерватории UPS (рисунок 6 (б)), несмотря на то что она является гораздо более удалённой от эпицентров, амплитуды dX/dt и dY/dt также достигают 1 нТл/с и варьируются от -1.13 до 1.17 нТл/с для X -компоненты. Для Y -компоненты эти значения составляют от -0.87 до 1.15 нТл/с. Гораздо слабее геомагнитный эффект рассматриваемых событий проявляется на амплитудах dZ/dt .

Сравнивая геомагнитные отклики от землетрясений, можно отметить, что для обоих событий идентично время возникновения и изменения сигнала, как в исходных данных компонент, так и в записях их производных. Возникновение подобных геомагнитных возмущений определяется многими факторами, такими как магнитуда сейсмического события, параметры очага, его глубина, геология района, свойства горных пород и массива. Следует отметить, что согласно современным представлениям, выделяют ряд основных физических механизмов возбуждения геомагнитных вариаций при землетрясениях. Наиболее значимым по амплитуде вызываемых геомагнитных вариаций следует рассматривать электрокинетический эффект, связанный с разделением электрических зарядов в результате просачивания минерализованных вод через горные породы, структура которых может к тому же изменяться в процессе разрушения как на стадии подготовки очага сейсмического события, так и в результате течения флюида в раскрывающихся трещинах в процессе самого землетрясения [6]. Возникновение сейсмоэлектрического эффекта может быть обусловлено наличием в подземной поровой жидкости диссоциированных ионов определённого знака, а также гидратированных ионов

противоположного знака на стенках подземных каналов и трещин [7]. Движение подземной жидкости, вызванное распространением сейсмической волны, приводит к увлечению ионов, которое сопровождается возникновением электрокинетических токов и соответственно магнитного поля, которое вносит возмущение в локальное геомагнитное поле.

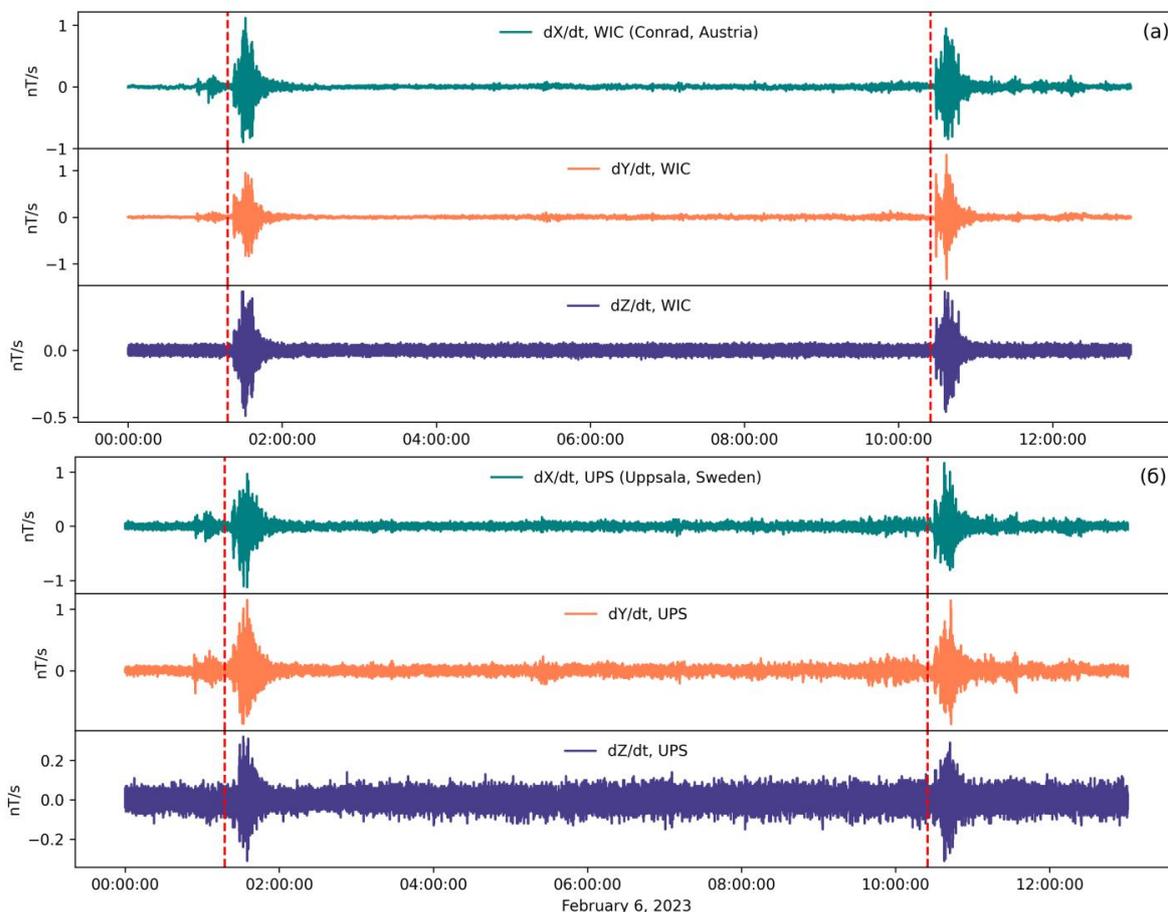


Рисунок 6. Графики скорости изменения компонент геомагнитного поля: dX (зелёным цветом), dY (оранжевым цветом) и dZ (фиолетовым цветом) по данным магнитных обсерваторий Conrad, Austria (а) и Uppsala, Sweden (б). Красные пунктирные линии – время первого и второго землетрясений.

Заключение

Таким образом, отмечен довольно похожий и практически синхронный характер аномальных геомагнитных вариаций в обсерваториях, расположенных на различных расстояниях от очага землетрясения. На основе сравнения геомагнитного поля отклики от землетрясений 6 февраля 2023 года с магнитудами $M_w=7.8$ и $M_w=7.5$ в исходных записях X , Y , Z и их производных dX/dt , dY/dt , dZ/dt идентичны для обоих землетрясений. Наибольшая амплитуда сигнала достигается на записях горизонтальных компонент dX/dt , dY/dt , наименьшая характерна для вертикальной компоненты dZ/dt . Рассмотренные геомагнитные эффекты землетрясений связаны с приходом сейсмических волн, что подтверждается записями волновых форм, зарегистрированных на ближайших к магнитным обсерваториям сейсмических станциях.

Проведённые исследования выполнены в рамках государственного задания Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке по теме «Изучение геофизических полей

и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах». Регистрационный номер 1021052806454-2-1.5.1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Soloviev, A.A. Geomagnetic Effect of the Earthquakes with $M_w = 7.5-7.8$ in Turkey on February 6, 2023. Dokl. Earth Sc. 511, 578–584 (2023)
2. Геофизические эффекты серии сильных землетрясений в Турции 06.02.2023 г.* / В. В. Адушкин, Ю. С. Рыбнов, С. А. Рябова [и др.] // Физика Земли. – 2023. – № 6. – С. 142–152. – DOI 10.31857/S0002333723060017. – EDN MUINKZ
3. Рябова С. А., Шалимов С. Л. Вариации полного электронного содержания ионосферы в период землетрясений в Турции 06.02.2023 // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2023. С. 343. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a
4. Имашев С.А., Паров С.В. Модифицированное сезонное разложение вариаций модуля индукции магнитного поля Земли. // Информационные технологии. – 2024. – №2. Том 30. 2024. – С. 59–67. – DOI: 10.17587/it.30.59-67
5. INTERMAGNET Operations Committee and Executive Council, INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 5.0.0, Ed. by B. St-Louis (2020)
6. Адушкин, В. В. Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов / В. В. Адушкин, С. А. Рябова, А. А. Спивак. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство ГЕОС", 2021. – 264 с. – ISBN 978-5-89118-834-1. – DOI 10.34756/GEOS.2021.16.37855. – EDN AAGOKF
7. Применение импедансов для анализа структуры поля косейсмических электромагнитных возмущений / Д. А. Стуков, В. В. Сурков, В. А. Пилипенко, В. А. Касимова // Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сборник материалов XV Международной конференции молодых ученых и студентов, Бишкек, 26–28 апреля 2023 года. – Бишкек: Научная станция РАН в г. Бишкеке, 2023. – С. 165–172. – EDN OPFVCZ

Рецензент: к. ф.-м. н. Кузиков С. И.