

УДК 550.38/34

ГЕОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ $M_w = 7.5–7.8$ В ТУРЦИИ 6 ФЕВРАЛЯ 2023 г.

© 2023 г. Член-корреспондент РАН А. А. Соловьев^{1,2,*}

Поступило 29.03.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принято к публикации 04.04.2023 г.

Исследуется отклик в вариациях геомагнитного поля, вызванный серией землетрясений с магнитудами $M_w = 7.5–7.8$ в Турции 6 февраля 2023 г. В качестве исходных данных использованы высокоточные наблюдения геомагнитного поля с 1-секундным временным разрешением, зарегистрированные на магнитных обсерваториях РФ и ближнего зарубежья от умеренных до высоких широт. В работе анализируются морфология геомагнитного сигнала, его амплитудно-частотные характеристики, всплески скорости изменения и задержки в отклике геомагнитного поля на землетрясения с магнитудой $M_w = 7–8$ в зависимости от расстояния до очага. Показано, что геомагнитный эффект наилучшим образом детектируется в скорости изменения поля, достигая аномальных амплитуд в 10 нТл/с. Задержка сигнала составляет от 221 до 592 с в зависимости от компоненты магнитного поля и расстояния до эпицентра, которое для выбранных обсерваторий лежит в диапазоне от 765 до 2650 км.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмоэлектромагнитные эффекты, геомагнитное поле, геомагнитная активность, магнитные обсерватории, интермагнет

DOI: 10.31857/S2686739723600613, EDN: RZSLXH

1. ВВЕДЕНИЕ

6–20 февраля 2023 г. на территории Турции произошла серия разрушительных землетрясений, наиболее сильные из которых характеризовались магнитудами M_w от 6.0 до 7.8. Основные толчки произошли в сейсмоактивном регионе сочленения Африканской, Анатолийской и Аравийской плит в окрестности восточно-анатолийского разлома. Активность региона усугубляется дополнительным воздействием Евразийской и Иранской плит. С точки зрения сеймотектоники и сейсмической опасности рассматриваемый регион изучен досконально – из последних работ следует отметить [1–3] и др. Таким образом, с учетом тектонической обстановки произошедшие землетрясения были вполне ожидаемы. Колоссальное число жертв было вызвано, прежде всего, близостью достаточно крупных городов к сработавшему восточно-анатолийскому разлому.

Первый толчок магнитудой $M_w = 7.8$ по данным USGS (<https://earthquake.usgs.gov/>) произо-

шел 6 февраля 2023 г. в 01:17:34 UT на глубине около 10 км непосредственно в зоне восточно-анатолийского разлома. За ним последовала серия афтершоков, наиболее значительным из которых было событие с магнитудой $M_w = 6.7$. Спустя 9 ч, в 10:24:50 UT, произошло второе мощное землетрясение с магнитудой $M_w = 7.5$. Местоположение второго очага находилось в системе более мелких разломов на расстоянии около 95 км к северу от первого очага. Его глубина залегания составила около 15 км согласно данным USGS. В дальнейшей серии афтершоков событие с максимальной магнитудой $M_w = 6.3$ было зафиксировано 20 февраля. С подробными характеристиками землетрясений, их очагов и сопутствующей тектонической обстановкой можно ознакомиться на сайтах соответствующих ведомств: USGS (<https://earthquake.usgs.gov/>), ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.ceme.gsras.ru/>), GCMT (<https://www.globalcmt.org/>). “Двойное” землетрясение, наблюдавшееся на территории Турции 6 февраля 2023 г., явилось достаточно уникальным явлением. Другой уникальностью серии турецких землетрясений послужило то, что первое событие $M_w = 7.8$ оказалось суперсдвиговым землетрясением, характеризующимся более высокими скоростями распространения разрыва по поверхности разлома, чем скорость поперечных волн.

¹ Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: a.soloviev@gcras.ru

Таблица 1. Расстояния от рассматриваемых обсерваторий до очага землетрясения $M_w = 7.8$ 6 февраля 2023 г.

Обсерватория	GLK	MHV	NCK	KLI	SPG	CLF
Расстояние до очага $M_w = 7.8$, км	765	1973	2022	2634	2650	3060

Предварительные результаты на эту тему опубликованы в [4].

Несмотря на подробную изученность сейсмичности регионов сочленения крупных тектонических плит, по-прежнему остаются недостаточно исследованными механизмы воздействия землетрясений и сопутствующих процессов, протекающих в литосфере, на геомагнитное поле. Считается, что такое воздействие может быть обусловлено растрескиванием горных пород, переменными движениями в поровом флюиде, разрядами статического электричества и т.п., приводящим к генерации сейсмических, акустических, атмосферных гравитационных волн, изменению полного электронного содержания ионосферы и электромагнитным УНЧ-возмущениям. Сравнительно недавно появилась отдельная область исследований в этом направлении – сейсмоэлектромагнетизм [5]. Основные затруднения в изучении геомагнитных эффектов, вызванных сейсмическими событиями, связаны с недостаточным объемом 1-секундных и более высокочастотных наблюдений геомагнитного поля, регистрация которых с приемлемой точностью началась не так давно, и их недостаточным географическим охватом. Как будет показано ниже, соответствующие эффекты можно наблюдать именно в секундных данных, в то время как в 1-минутных наблюдениях, регистрация которых была начата существенно раньше, они сглаживаются и становятся незаметными.

Настоящая работа не преследует цели поиска предвестников землетрясений в вариациях магнитного поля или оценки триггерного воздействия солнечной активности и связанных с ней возмущений космической погоды на сейсмичность Земли. На эту тему регулярно выходят из печати немало статей (напр., [6–8]), однако существенных продвижений в нахождении таких предвестников не наблюдается. Об этом свидетельствуют систематически публикуемые опровержения найденных предвестников и статистически значимых взаимосвязей между геомагнитными вариациями и землетрясениями [9–11]. Наша цель, наоборот, заключается в изучении геомагнитного эффекта от состоявшегося землетрясения.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных рассматривались высокоточные геомагнитные наблюдения, регистрируемые магнитными обсерваториями. Отбор обсерваторий осуществлялся по следующим критериям:

1. наличие измерений геомагнитного поля с 1-секундным интервалом,
2. отсутствие в данных пропусков за время основных толчков 6 февраля 2023 г.,
3. достаточная близость к очагам землетрясений 6 февраля 2023 г., позволяющая детектировать искомый геомагнитный эффект в данных.

Источниками данных послужили Аналитический центр геомагнитных данных (<http://geomag.gcras.ru/>) и ИНТЕРМАГНЕТ (<https://intermagnet.org>). К сожалению, на сайте SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/>), который предоставляет доступ к 1-секундным данным глобальной сети магнитовариационных станций, данные за 6 февраля 2023 г. отсутствуют. В результате были отобраны следующие обсерватории: “Гюлагарак” (IAGA-код GLK, Армения), “Михнево” (IAGA-код MHV, Московская обл.), “Надьценк” (IAGA-код NCK, Венгрия), “Климовская” (IAGA-код KLI, Архангельская обл.), “Санкт-Петербург” (IAGA-код SPG, Ленинградская обл.) и “Шамбон-ля-Форэ” (IAGA-код CLF, Франция).

В число обсерваторий, на которых был зафиксирован геомагнитный отклик от серии землетрясений 6 февраля 2023 г., вошли GLK, MHV, KLI и SPG. Последняя является официальным членом сети ИНТЕРМАГНЕТ. Все перечисленные обсерватории входят в межрегиональный сегмент геомагнитных наблюдений, ядром которого является ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” на базе Геофизического центра РАН [12]. Данные этих обсерваторий по мере поступления в центр непрерывно обрабатываются средствами аппаратно-программного комплекса (АПК) МАГНУС на предмет распознавания техногенных и природных аномалий магнитного поля [13] и публикуются онлайн с присуждением DOI [14–16]. Ближайшая к эпицентрам обсерватория GLK ведет регистрацию параметров геомагнитного поля с начала 2020 г. С учетом этого, для сравнения геомагнитных эффектов от других сильных землетрясений дополнительно были отобраны события с магнитудой $M_w \geq 7$ за период 01/01/2020–20/03/2023. На рис. 1 показана карта эпицентров отобранных землетрясений и рассматриваемых обсерваторий. В табл. 1 представлены расстояния от выбранных обсерваторий до очага землетрясения $M_w = 7.8$.

Для оценки сейсмогенного геомагнитного эффекта нами анализировались следующие данные, полученные на выбранных обсерваториях:

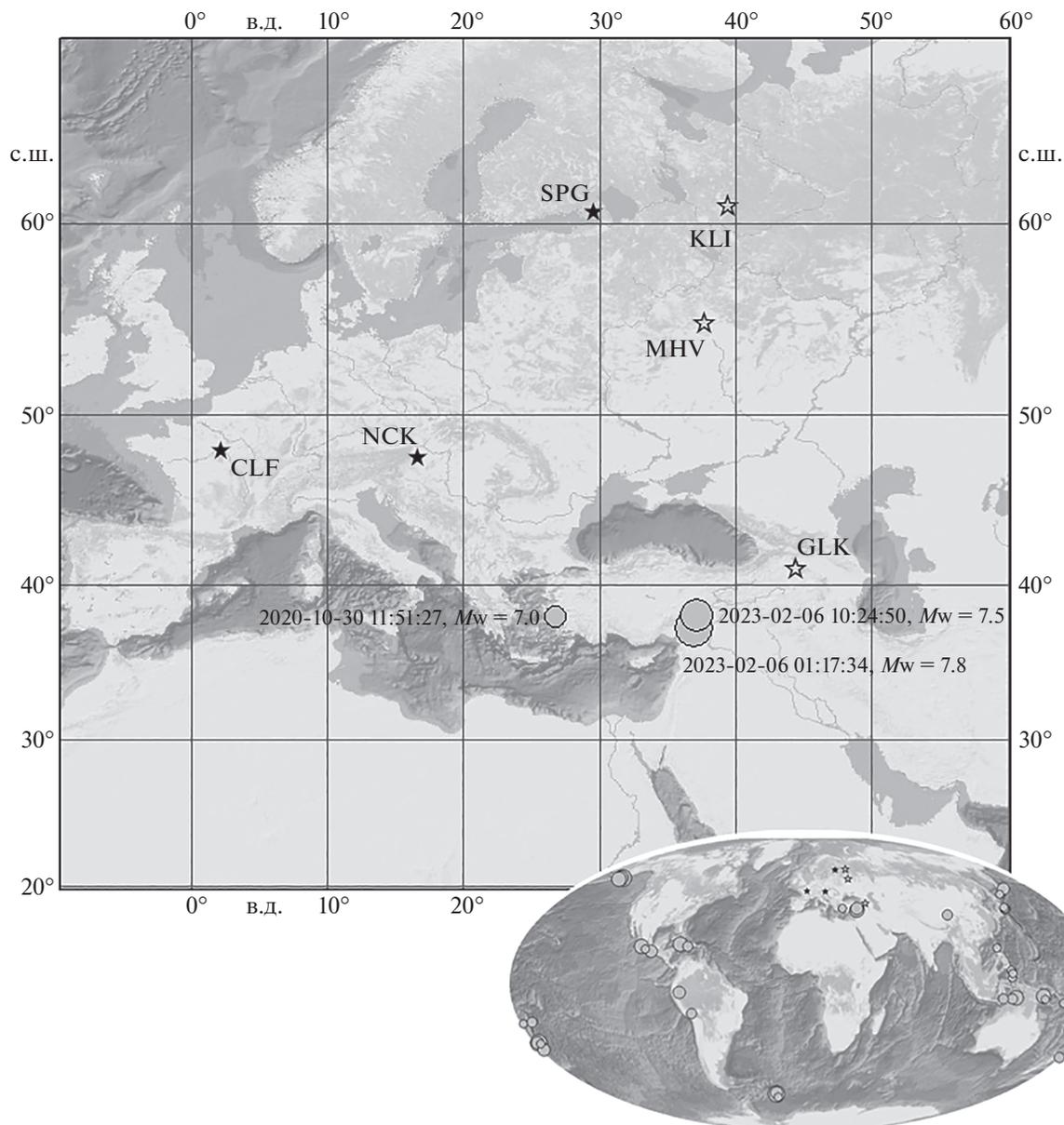


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений с магнитудой $M_w = 7+$ за период 2020-01-01–2023-03-20 по данным USGS (серые круги) и отобранные магнитные обсерватории, предоставляющие 1-секундные данные (черные звезды – обсерватории сети ИНТЕРМАГНЕТ, полые звезды – не входящие в ИНТЕРМАГНЕТ обсерватории).

1. 1-секундные магнитограммы трех компонент геомагнитного поля (X – северная, Y – восточная и Z – вертикальная),

2. соответствующие им записи скорости изменения геомагнитного поля $d\mathbf{B}/dt$,

3. графики калибровочной кривой dF .

$d\mathbf{B}/dt$ и dF рассчитывались по рекомендуемым ИНТЕРМАГНЕТ формулам [17]:

$$d\mathbf{B}(i) = (B(i+1) - B(i-1))/2,$$

$$dF(i) = F_s(i) - \text{sqrt}(X(i)^2 + Y(i)^2 + Z(i)^2),$$

где B – одна из трех компонент вектора магнитной индукции, F_s – измеренный модуль вектора

магнитной индукции, i – текущий отсчет по времени.

Кроме того, в анализе использовались данные индексов геомагнитной активности, которые служат наглядным индикатором состояния космической погоды. Данные доступны на сайте Международной службы геомагнитных индексов ISGI (<https://isgi.unistra.fr/>).

3. АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

В обсерваторской практике калибровочная кривая dF служит важным индикатором корректной и согласованной работы векторного и ска-

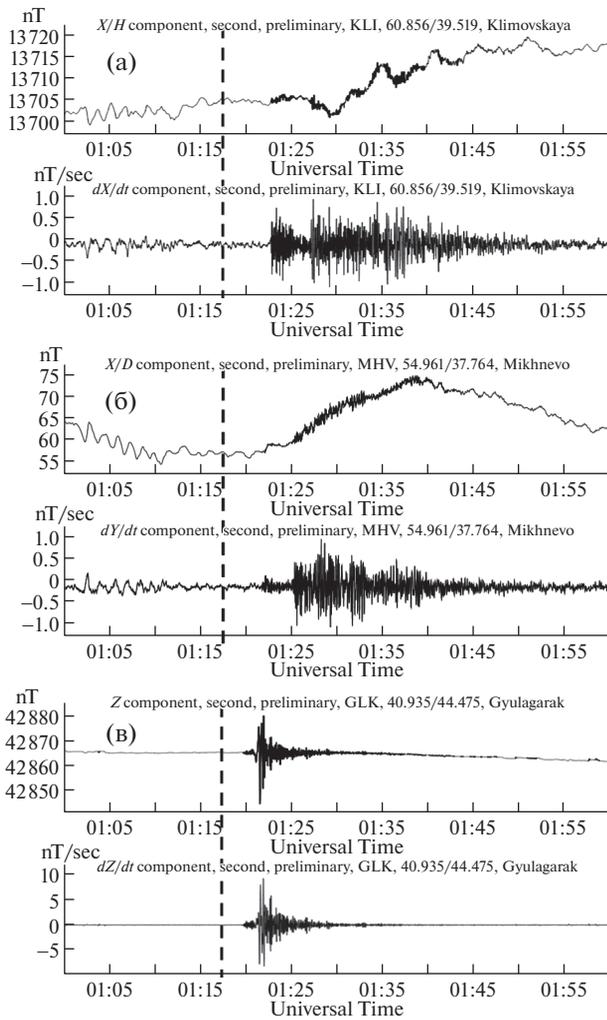


Рис. 2. Вариации (нТл, верхний график) и скорость изменения геомагнитного поля (нТл/с, нижний график) за период 01:00–02:00 UT 6 февраля 2023 г. Время первого землетрясения с $M_w = 7.8$, произошедшего в 01:17:34 UT, помечено вертикальной пунктирной линией. На рисунке (а) в качестве примера показаны 1-секундные данные компоненты X , зарегистрированные на обсерватории KLI, на рисунке (б) – данные компоненты Y обсерватории MHV, на рисунке (в) – данные компоненты Z обсерватории GLK. На верхнем графике темным цветом выделены сейсмогенные вариации, распознанные АПК МАГНУС (<http://geomag.gcras.ru>).

лярного магнитометров, которые непрерывно измеряют вариации трех компонент и модуль вектора магнитной индукции соответственно. Векторный магнитометр крайне чувствителен к механическим воздействиям и к резким температурным вариациям, о присутствии которых свидетельствуют выбросы и дрейфы на записи dF . За период всех рассматриваемых событий ряд dF , построенный для каждой из обсерваторий, не обнаружил флуктуаций, что исключает вибрацию постаumenta, на котором установлен векторный

магнитометр. Таким образом, несмотря на наблюдаемые 6 февраля 2023 г. горизонтальные смещения до 5 м в зоне восточно-анатолийского разлома, механический эффект от землетрясений в вариациях геомагнитного поля не выявлен.

В течение 5–6 февраля 2023 г. наблюдался пониженный уровень геомагнитной активности: геомагнитные K -индексы на рассматриваемых обсерваториях и индекс K_p , отражающий общепланетарную обстановку, не превышали 4 баллов, а индекс Dst , характеризующий интенсивность магнитосферного кольцевого тока, не опускался ниже -22 нТл (<http://geomag.gcras.ru/>; <https://isgi.unistra.fr/>). Это обстоятельство исключает ложную трактовку выделяемого сигнала как эффекта космической погоды вместо эффекта сейсмического события, а также позволяет более отчетливо выделить геомагнитный отклик на общем фоне.

На исходных записях исследуемый геомагнитный эффект представляет собой высокочастотный сигнал (~ 0.1 Гц) незначительной амплитуды длительностью от 5 до 15 мин (рис. 2). По своей волновой форме исследуемые вариации сравнимы с естественными флуктуациями геомагнитного поля в таком же частотном диапазоне, включая пульсации типа $Pc2-3$ [18], что затрудняет их детектирование по спектральным характеристикам. Гораздо лучше сигнал выделяется на записях скорости изменения геомагнитного поля dB/dt в виде сильных изолированных всплесков с последующим затуханием (рис. 2, 3). Детальное сравнение геомагнитных откликов от землетрясений $M_w = 7.8$ и $M_w = 7.5$ 6 февраля 2023 г. показало, что их морфология и в исходных данных X , Y , Z , и в записях их производных dB/dt идентична для обоих землетрясений. Ниже остановимся на наиболее характерных особенностях.

В табл. 2 приведены временные задержки между землетрясениями 6 февраля 2023 г. и всплесками dB/dt . Поскольку в данных Z -компоненты, зарегистрированных на обсерваториях MHV (рис. 3 б) и SPG (рис. 3 г), явного эффекта не наблюдается, соответствующие поля таблицы не заполнены. Из табл. 2 и рис. 2, 3 следует, что задержка в отклике геомагнитного поля на произошедшее землетрясение увеличивается с ростом расстояния до его эпицентра. На удаленных обсерваториях (MHV, KLI и SPG) запаздывание сигнала в Y -компоненте больше, чем на компонентах X и Z . На ближайшей к эпицентру обсерватории GLK возмущение поля во всех трех компонентах наблюдается одновременно.

С уменьшением расстояния до эпицентра увеличивается амплитуда сигнала, причем чем ближе обсерватория к эпицентру, тем сигнал более локализован во времени (см. рис. 3). Наибольшая амплитуда сигнала достигается на записях dY/dt .

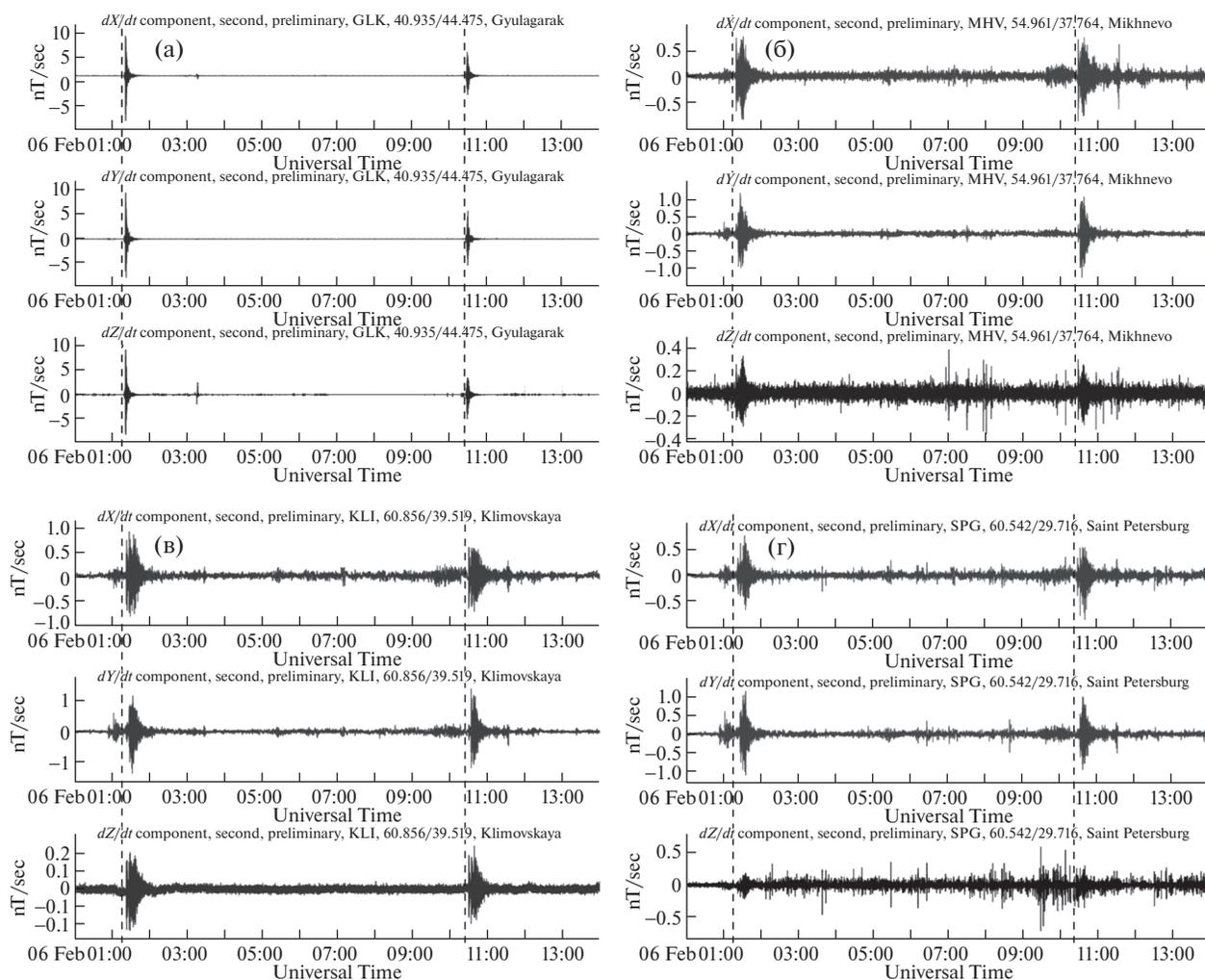


Рис. 3. Скорость изменения геомагнитного поля (нТл/с) по трем компонентам X (верхний график), Y (средний график) и Z (нижний график) за период 00:00–14:00 UT 6 февраля 2023 г. Времена двух землетрясений с $M_w = 7.8$ и $M_w = 7.5$ помечены вертикальными пунктирными линиями. На рисунке показаны данные обсерваторий, упорядоченных по расстоянию от эпицентров землетрясений: GLK (а), MHV (б), KLI (в) и SPG (г) (<http://geomag.gcras.ru>).

На ближайшей к эпицентрам обсерватории GLK амплитуда $|dY/dt|$ превышает 10 нТл/с; на самой отдаленной от эпицентров обсерватории SPG амплитуда $|dY/dt|$ достигает значения 1 нТл/с.

Каковы характерные амплитуды dB/dt по горизонтальным компонентам X и Y во время силь-

ных геомагнитных бурь? На умеренных широтах (обсерватория GLK) в магнито-спокойное время dB/dt не превышает 0.5 нТл/с. Во время бурь эти значения возрастают, но, как правило, остаются в пределах 1 нТл/с. На средних широтах (обсерватория MHV) во время сильнейших бурь значения

Таблица 2. Разница во времени (в секундах) между землетрясениями 6 февраля 2023 г. и всплеском dB/dt в обсерваторских данных

Код	dX/dt		dY/dt		dZ/dt	
	$M_w = 7.8$	$M_w = 7.5$	$M_w = 7.8$	$M_w = 7.5$	$M_w = 7.8$	$M_w = 7.5$
GLK	244	223	243	221	244	223
MHV	255	245	470	437	—	—
KLI	318	313	587	558	320	310
SPG	319	318	592	558	—	—

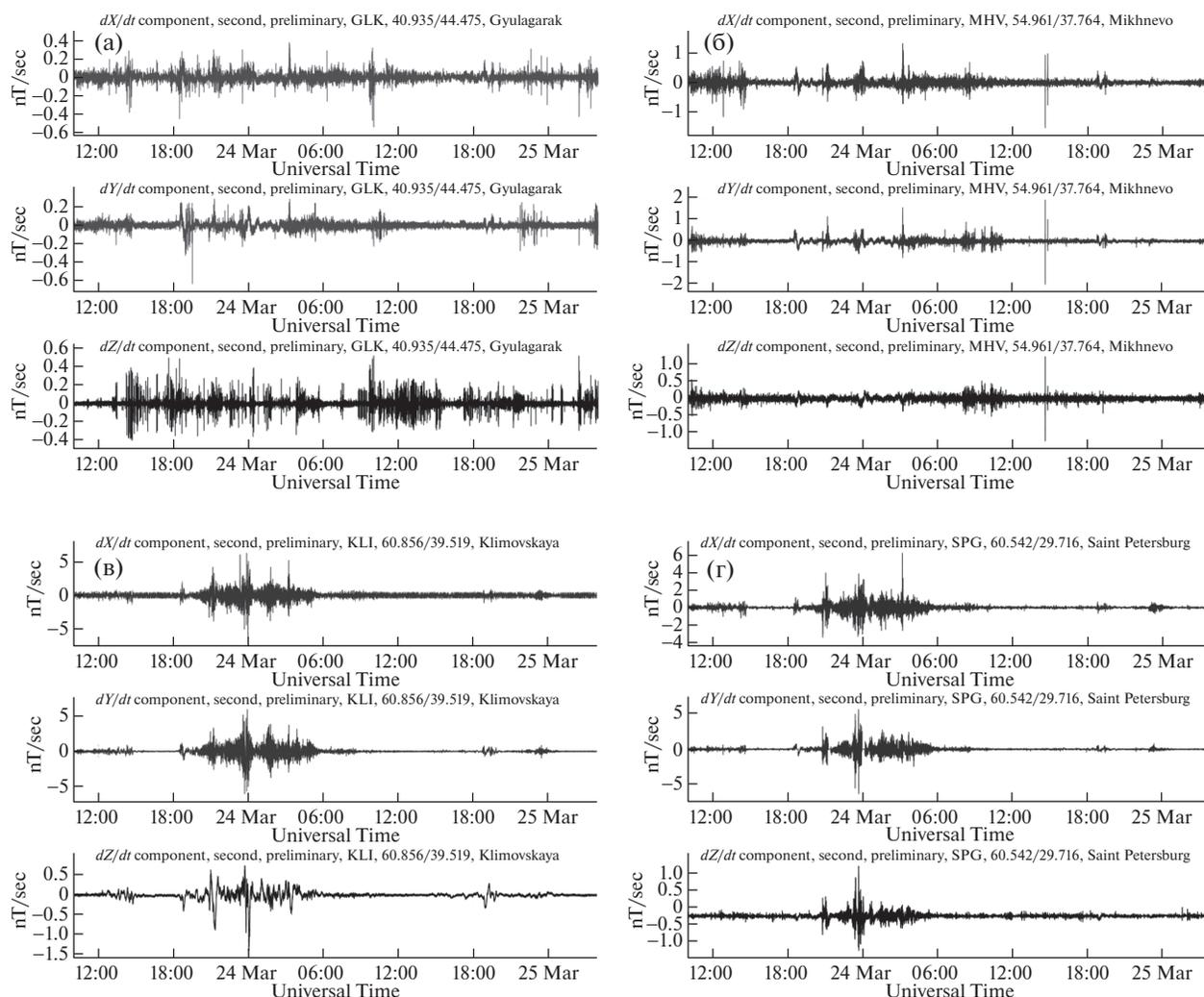


Рис. 4. Скорость изменения геомагнитного поля (нТл/с) за период сильной геомагнитной бури 23–25 марта 2023 г. Данные и обозначения аналогичны рис. 3.

dB/dt могут незначительно превышать 1 нТл/с. На высоких широтах (обсерватории SPG и KLI) dB/dt может достигать нескольких нТл/с. Таким образом, значение скорости изменения поля в 10 нТл/с, которое было зафиксировано в данных обсерватории GLK в результате землетрясений 6 февраля 2023 г., является экстремальным для любых широт. Этот результат указывает на то, что из всех природных процессов, возбуждающих быстрые изменения геомагнитного поля, самыми мощными являются сейсмические события на относительно небольшом расстоянии от пункта наблюдений.

Продemonстрируем сказанное на примере сильнейшей (на момент написания статьи) бури 25-го цикла солнечной активности, которая произошла 23–25 марта 2023 г. Планетарный индекс Кр достигал 8 баллов, Dst-индекс опустился до -200 нТл. На одной из самых северных магнитных обсерваторий РФ “Белое море” (IAGA-код WSE)

[12] значения $|dB/dt|$ по минутным данным достигали аномальной отметки ~ 400 нТл/мин. Значения регионального К-индекса геомагнитной активности на многих обсерваториях РФ составляли 9 баллов. Основная фаза бури развивалась с 12:00 UT 23 марта до 12:00 UT 24 марта. На рис. 4 приведены графики dB/dt по трем компонентам, зарегистрированным 23–25 марта 2023 г. на тех обсерваториях, где был детектирован сейсмогенный отклик геомагнитного поля.

Из приведенного анализа следует, что на фоне повышенной геомагнитной активности сейсмогенный геомагнитный сигнал возможно уверенно распознать только на расстоянии в пределах 1000 км от эпицентра при магнитуде $M_w \geq 7.5$. Иными словами, если 6 февраля 2023 г. имела место сильная геомагнитная буря, то геомагнитный отклик от двух землетрясений был бы надежно детектирован только на обсерватории GLK, а на остальных обсерваториях он был бы зашумлен

более продолжительными вариациями геомагнитного поля от околоземных источников.

Из всех остальных землетрясений, показанных на карте на рис. 1, геомагнитный эффект в данных рассматриваемых обсерваторий был зафиксирован только от землетрясения с магнитудой $M_w = 7.0$, произошедшего 30 октября 2020 г. в Эгейском море на глубине около 20 км. По сравнению с другими землетрясениями, его эпицентр находился достаточно близко к пунктам наблюдений. Вызванные им геомагнитные возмущения проявили себя только в данных обсерваторий GLK и MHV. По сравнению с землетрясением $M_w = 7.5$, амплитуда всплесков на записях dX/dt и dY/dt обсерватории GLK, вызванных землетрясением с $M_w = 7.0$ на расстоянии 1557 км, оказалась в 30 раз меньше, а в данных обсерватории MHV, расположенной на расстоянии 2070 км от эпицентра, – в 3 раза меньше. Задержка в отклике геомагнитного поля на обсерваториях GLK и MHV оказалась больше, чем задержка в отклике на землетрясение $M_w = 7.5$ на аналогичных расстояниях, и составила 490 и 598 с на X -компоненте и 524 и 646 с на Y -компоненте обсерваторий GLK и MHV соответственно. Полученные результаты согласуются с [19], где сообщалось о схожих гармонических геомагнитных сигналах, сопровождающих землетрясения с магнитудами в диапазоне 7.0–8.0, в радиусе 2000 км от эпицентра, а также предлагались возможные механизмы их возникновения.

Следует отметить, что на обсерватории NCK, находящейся примерно на том же расстоянии от эпицентра землетрясения $M_w = 7.8$, что и MHV, а также на обсерватории CLF, расположенной в 3000 км, геомагнитный эффект не был обнаружен ни на одной из компонент ни от одного из трех упомянутых землетрясений ($M_w = 7.8, 7.5$ и 7.0), что свидетельствует об анизотропии электромагнитного сигнала. Обсерватории с 1-минутной регистрацией данных в исследовании не рассматривались, т.к. исследуемые эффекты в таких данных не фиксируются. Это связано с тем, что при усреднении исходных, более высокочастотных наблюдений соответствующие сигналы сглаживаются.

Обнаружение квазипериодических сигналов с частотой ~ 0.1 Гц на геомагнитных записях подтверждает возможность распространения низкочастотных электромагнитных полей от сейсмических источников на расстояния до 2700 км при магнитуде 7.5–7.8. На больших расстояниях УНЧ волны, по всей видимости, затухают при распространении в литосфере [5] или посредством передачи акустического/гравитационного сигнала через атмосферу с последующим возбуждением ионосферы и генерацией геомагнитных пульсаций [8, 19]. Для вычисления устойчивых зависимостей между магнитудой землетрясения и рас-

стоянием до его эпицентра с одной стороны и задержкой геомагнитного отклика и амплитудой всплеска $d\mathbf{B}/dt$ с другой стороны требуется существенно большая статистика наблюдений. Представленный в статье анализ дополнительно свидетельствует о востребованности в расширении сети 1-секундных наблюдений геомагнитного поля, требуемых для изучения не только тонких эффектов космической погоды [20], но и влияния сейсмических событий на вариации геомагнитного поля.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты, представленные в этой статье, получены с использованием данных, регистрируемых геомагнитными обсерваториями. Мы благодарим национальные институты, которые их поддерживают, сеть ИНТЕРМАГНЕТ за продвижение высоких стандартов функционирования геомагнитных обсерваторий (<http://www.intermagnet.org>) и Межрегиональный центр геомагнитных данных (<http://geomag.gcras.ru>) за свободное распространение данных в режиме онлайн. В работе использовались данные и сервисы ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akkar S., Azak T., Çan T., et al. Evolution of seismic hazard maps in Turkey // Bull Earthquake Eng. 2018. 16. 3197–3228. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0349-1>
2. Alver F., Kılıçarslan Ö., Kuterdem K., Türkoğlu M., Şentürk M.D. Seismic Monitoring at the Turkish National Seismic Network (TNSN) // Summ. Bull. Internatl. Seismol. Cent., July-December 2017. 53(II). P. 41–58. <https://doi.org/10.31905/D9GRP8RD>
3. Güvercin S.E., Karabulut H., Konca A.O., Doğan U., Ergintav S. Active seismotectonics of the East Anatolian Fault // Geophysical Journal International. 2022. 230(1). P. 50–69. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac045>
4. Rosakis A.J., Abdelmeguid M., Elbanna A. Evidence of Early Supershear Transition in the Mw 7.8 Kahramanmaraş // Earthquake From Near-Field Records. <https://doi.org/10.31223/X5W95G>
5. Molchanov O.A., Hayakawa M. Seismo-Electromagnetics and Related Phenomena: History and Latest Results. TERRAPUB, Tokyo. 2008. 189 p.
6. Shekotov A., Chebrov D., Hayakawa M., et al. Short-term earthquake prediction in Kamchatka using low-

- frequency magnetic fields // *Nat Hazards*. 2020. 100. 735–755.
<https://doi.org/10.1007/s11069-019-03839-2>
7. Гульельми А.В., Клайн Б.И., Куражковская Н.А. О связи землетрясений с геомагнитными бурями // *Физика Земли*. 2021. № 6. С. 131–136.
<https://doi.org/10.31857/S0002333721060028>
 8. Hayakawa M., Kasahara Y., Nakamura T., Muto F., Horie T., Maekawa S., Hobara Y., Rozhnoi A.A., Solovieva M., Molchanov O.A. A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes // *J. Geophys. Res.* 2010. 115. A09305,
<https://doi.org/10.1029/2009JA015143>
 9. Masci F. On claimed ULF seismogenic fractal signatures in the geomagnetic field // *J. Geophys. Res.* 2010. 115. A10236.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015311>
 10. Love J.J., Thomas J.N. Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes // *Geophys. Res. Lett.* 2013. 40. 1165–1170.
<https://doi.org/10.1002/grl.50211>
 11. Козырева О.В., Пилипенко В.А. О взаимосвязи геомагнитной возмущенности и сейсмической активности для региона Аляски // *Геофизические исследования*. 2020. Т. 21. № 1. С. 33–49.
<https://doi.org/10.21455/gr2020.1-3>
 12. Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Красноперов Р.И., Груднев А.А., Кудин Д.В., Карапетыан Д.К., Симонян А.О. Успехи организации геомагнитного мониторинга в России и ближнем зарубежье // *Вестник ОНЗ РАН*. 2018. 10. NZ4001,
<https://doi.org/10.2205/2018NZ000357>
 13. Кудин Д.В., Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Старостенко В.И., Сумарук Ю.П., Легостаева О.В. Система ускоренной подготовки квазиокончательных данных стандарта ИНТЕРМАГНЕТ // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2021. Т. 61. № 1. С. 46–59.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021010090>
 14. Soloviev A., Dobrovolsky M., Kudin D., Sidorov R. Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory Klimovskaya (IAGA code: KLI). ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2015.
<https://doi.org/10.2205/kli2011min>
 15. Soloviev A., Dobrovolsky M., Kudin D., Sidorov R. Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG). ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2016.
<https://doi.org/10.2205/SPG2012min>
 16. Soloviev A., Dzeboev B., Karapetyan J., Grudnev A., Kudin D., Sidorov R., Nisilevich M., Krasnoperov R. Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory Gyulagarak (IAGA code: GLK). ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2020.
<https://doi.org/10.2205/GLK2020min>
 17. INTERMAGNET Operations Committee and Executive Council. St-Louis B. (Ed.). 2020. INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 5.0.0.
 18. Зелинский Н.Р., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А. Алгоритм распознавания геомагнитных пульсаций Pc3 на секундных данных экваториальных обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ // *Физика Земли*. 2014. № 2. С. 91–99.
 19. Канониди Х.Д. Об источнике особого вида геомагнитных пульсаций во время землетрясений // *Известия ВУЗов. Северо-кавказский регион. Естественные науки*. № 2. 2014. С. 29–44.
 20. Соловьев А.А. Некоторые задачи геомагнетизма, решаемые по данным наземных и спутниковых наблюдений // *Геология и геофизика*. 2023.
<https://doi.org/10.15372/GiG2023112>

GEOMAGNETIC EFFECT OF THE EARTHQUAKES $M_w = 7.5-7.8$ IN TURKEY ON FEBRUARY 6, 2023

Corresponding Member of the RAS A. A. Soloviev^{a,b,#}

^a *Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#] *E-mail: a.soloviev@gcras.ru*

We study the response in geomagnetic field variations caused by a series of earthquakes with magnitudes $M_w = 7.5-7.8$ in Turkey on 6 February 2023. Initial data represent high-precision observations of the geomagnetic field with a 1-s sampling rate recorded at magnetic observatories of Russia and neighboring countries from middle to high latitudes. The paper analyzes the morphology of the geomagnetic signal, its amplitude-frequency characteristics, pulses in the rate of change and delays of the geomagnetic field response to earthquakes with magnitudes $M_w = 7-8$ depending on the distance to the source. The results suggest that the geomagnetic effect is best detected in the rate of change recordings, reaching anomalous amplitudes of 10 nT/s. The signal delay is from 221 to 592 s depending on the magnetic field component and the distance to the epicenter, which for the selected observatories falls in the range from 765 to 2650 km.

Keywords: earthquakes, seismoelectromagnetic effects, geomagnetic field, geomagnetic activity, magnetic observatories, intermagnet