

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ СЕРИИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ТУРЦИИ 06.02.2023 г.

© 2023 г. В. В. Адушкин¹, Ю. С. Рыбнов¹, С. А. Рябова¹, А. А. Спивак¹, *, А. В. Тихонова¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: aaspivak100@gmail.com

Поступила в редакцию 20.04.2023 г.

После доработки 03.05.2023 г.

Принята к публикации 13.06.2023 г.

Приведены результаты инструментальных наблюдений, выполненных в приземном слое атмосферы за микробарическими и геомагнитными вариациями, а также вариациями электрического поля и критической частоты регулярного F_2 -слоя ионосферы в период серии разрушительных землетрясений в Турции 06.02.2023 г., в частности, следующих сразу друг за другом двух сильных землетрясений с магнитудами 7.8 и 6.7. Показано, что землетрясения сопровождалось вариациями магнитного и электрического полей, генерацией инфразвуковых волн, зарегистрированных на значительном расстоянии от источников, а также вариациями критической частоты f_0F_2 .

Ключевые слова: землетрясение, инфразвук, магнитное поле, электрическое поле, ионосфера, критическая частота, вариация.

DOI: 10.31857/S0002333723060017, EDN: MUINKZ

1. ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения предоставляют хорошие возможности для исследования отклика геофизических полей на сильные возмущения. При этом наряду с вулканами и другими сильными природными явлениями землетрясения следует рассматривать в качестве одного из основных явлений, которые значительно интенсифицируют процессы межгеосферных взаимодействий. Сопутствующие землетрясениям, особенно сильным, вариации электрического и магнитного полей отражают сложные процессы, связанные с передачей высвобождающейся механической энергии в недрах Земли в верхние геосферы – атмосферу и ионосферу как одну из ее составных частей. Посредником в этих процессах могут являться как вызываемые землетрясениями повышенные радоновые эманации либо атмосферные возмущения в виде, например, внутренних гравитационных и инфразвуковых волн с источниками в эпицентральной области очага, так и, как один из возможных вариантов, возмущение внутренних источников, не исключая магнитное динамо Земли при воздействии на него сейсмических волн [Адушкин, Спивак, 2023].

Изучая вызванные землетрясениями вариации геофизических полей, можно существенно расширить имеющиеся представления о характере протекающих при землетрясениях процессах, а также, что немаловажно, улучшить понимание

связей между внутренними и внешними геосферами.

В настоящей работе рассматриваются геофизические эффекты, связанные с серией сильных землетрясений, произошедших в Турции 06.02.2023 г. и привлечших к себе большое внимание вследствие значительных разрушительных последствий.

2. СЕРИЯ ТУРЕЦКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 06.02.2023 г.

Согласно каталогу открытого доступа USGS серия землетрясений, включая разрушительные с магнитудой $M \geq 6.5$, произошла на территории Турции 06.02.2023 г. в период с 01:17 UTC до 12:02 UTC (рис. 1). Основные характеристики наиболее сильных из землетрясений приведены в табл. 1. Из табл. 1, в частности, следует, что первые два события (1 и 2) произошли с интервалом менее 10 мин. При этом расстояние между очагами составило ~ 12 км, что позволяет рассматривать эти события как двойное землетрясение. Все события из табл. 1 произошли на ограниченной территории. Расстояние между наиболее мощными событиями с магнитудой 7.8 и 7.5 составило ~ 88 км. Все рассмотренные землетрясения относятся к коровым. В этом случае для оценки размеров очагов в виде эллипсоидов вращения с продольной (a) и поперечной (b) осями допустимо применять зависимости Ризниченко [Ризниченко, 1976]:



Рис. 1. Схема расположения обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ (красной стрелкой указано место расположения очагов землетрясений).

$$\lg a = 0.440M - 1.289,$$

$$\lg b = 0.401M - 1.448,$$

в которых размер осей a и b выражен в км.

Значения a и b приведены в табл. 2 и свидетельствуют о том, что, например, “активная” площадь S очага наиболее сильного землетрясения с $M = 7.8$ составляет более 5000 км^2 , а объем вещества V , непосредственно вовлеченного в процесс излучения сейсмических волн составляет при этом $\sim 1.33 \times 10^6 \text{ км}^3$. Для справки в табл. 2 приведена также сейсмическая энергия землетря-

сений W , оцененная с использованием соотношения Гуттенберга–Рихтера [Касахара, 1985]:

$$\lg W = 11.8 + 1.5M,$$

где энергия W выражена в эрг.

Следует отметить, что полученные значения W и V определяют величину объемной плотности высвободившейся сейсмической энергии e в очаге землетрясения 1, равную $\sim 24 \text{ Дж/км}^3$, что по порядку величины согласуется с данными ранее выполненных исследований [Касахара, 1985; Садовский и др., 1983].

Таблица 1. Параметры землетрясений

№ п/п	Дата	Время (UTC)	Магнитуда	Географические координаты		Глубина, км
				широта	долгота	
1	06.02.2023	01:17:34	7.8	37.230° N	37.019° E	10
2	»	01:28:15	6.7	37.189° N	36.893° E	10
3	»	10:24:49	7.5	38.008° N	37.211° E	13

Таблица 2. Параметры очагов сейсмических событий

№ п/п	M	a , км	b , км	S , км ²	E , Дж
1	7.8	~139	~48	~6650	$\sim 3.16 \times 10^{16}$
2	6.7	~45	~10	~486	$\sim 7.1 \times 10^{14}$
3	7.5	~102	~36	~3720	$\sim 1.12 \times 10^{16}$

Таблица 3. Данные по магнитным обсерваториям

Код	Страна	ГЕО		R , км	B^* , нТл
		Широта	Долгота		
SUA	Румыния	44.68° N	26.25° E	~1230	~20
PAG	Болгария	42.515° N	24.177° E	~1240	~18
GCK	Сербия	44.633° N	20.767° E	~1500	~14
LVV	Украина	49.9° N	23.75° E	~1770	~20
MHV	Россия	54.961° N	37.763° E	~1980	~22
DUR	Италия	41.39° N	14.28° E	~2000	~20
BEL	Польша	51.836° N	20.789° E	~2070	~22
HLP	Польша	54.6035° N	18.8107° E	~2380	~22
NUR	Финляндия	60.51° N	24.66° E	~2740	~19
UPS	Швеция	59.903° N	17.353° E	~2890	~18
EBR	Испания	40.957° N	0.333° E	~3170	~18
SPT	Испания	39.55° N	4.35° W	~3580	~16
SFS	Испания	36.667° N	5.945° W	~3790	~19
GUI	Испания	28.321° N	16.441° W	~5030	~14
TDC	Великобритания	37.067° S	12.316° W	~9690	~14

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных привлекались результаты инструментальных наблюдений, выполненных в Геофизической обсерватории “Михнево” (MHV, 54.96° N; 37.76° E) и в Центре геофизического мониторинга Москвы (ЦГМ, 55.70° N; 37.57° E) [Адушкин и др., 2016; Спивак и др., 2016]. Вертикальная компонента напряженности электрического поля E регистрировалась измерителем напряженности электрического поля VOLTEK EFM-100 в диапазоне частот 0–10 Гц. Компоненты магнитной индукции B_x , B_y и B_z , ориентированные соответственно в направлении север–юг, восток–запад и вертикально вниз, регистрировались в MHV с использованием цифрового трехкомпонентного феррозондового магнитометра LEMI-018 с частотой дискретизации 1 Гц. При анализе вызванных геомагнитных вариаций привлекались также данные ряда магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET [https://www.intermagnet.org/index-eng.php] (табл. 3, рис. 1).

Микробарические вариации, содержащие вызванные землетрясениями инфразвуковые сигнала,

регистрировались с помощью микробарометра МБ-03, обеспечивающего устойчивую регистрацию акустических сигналов амплитудой от 0.01 до 200 Па в диапазоне частот 0.0003–10 Гц (по уровню – 3 дБ). Поиск вызванных землетрясениями сигналов выполнялся на основе анализа исходной записи микробарометра в диапазоне частот 0.005–0.1 Гц с учетом расстояния до источника сигнала и вероятной скорости его распространения в стратосферном волноводе (280–310 м/с) [Куличков и др., 2004]. Регистрация метеопараметров, характеризующих состояние атмосферы, выполнялась в MHV и ЦГМ с помощью автоматизированных цифровых метеостанций Davis Vantage Pro 2.

При анализе влияния землетрясений на ионосферу привлекались в виде ионограмм результаты высотно-частотного зондирования на Национальной обсерватории “Афины” (координаты: 38° N; 23.5° E), размещенные в свободном доступе на сайте обсерватории (http://www.iono.noa.gr/athens-digisonde).

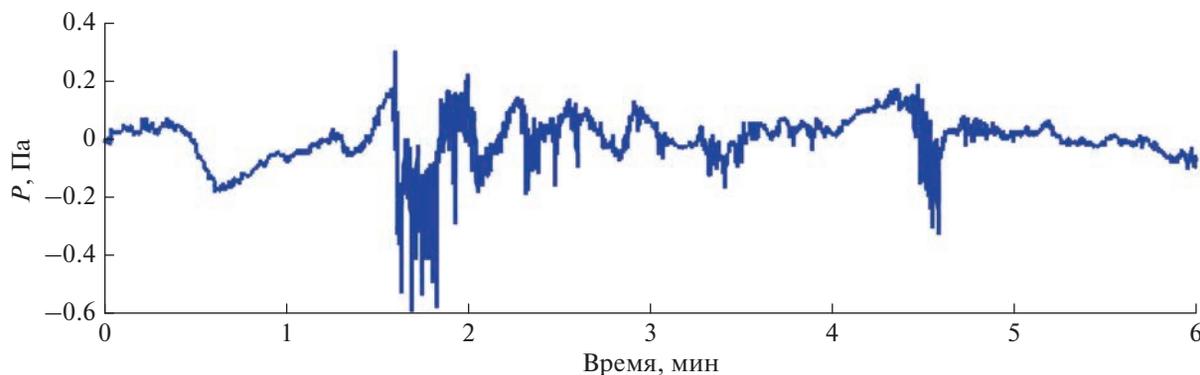


Рис. 2. Инфразвуковой сигнал в диапазоне частот 0.01–10 Гц, вызванный приходом сейсмических волн от двойного землетрясения 1 и 2 по данным ЦГМ (начало записи 01:25 UTC).

Следует отметить, что период рассматриваемых землетрясений характеризовался спокойными метеорологическими условиями в пунктах регистрации, отсутствием значимых локальных возмущений атмосферного электрического поля, связанных с источниками природного и техногенного происхождения, а также достаточно спокойной геомагнитной обстановкой (значения K_p индекса магнитной активности не превышало 3), что упростило выделение вызванных возмущений геофизических полей.

4. ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Возмущение микробарического поля атмосферы при землетрясениях происходит за счет двух механизмов: 1) — в результате сейсмоакустического эффекта в период прохождения сейсмического сигнала через точку наблюдений; 2) — в результате распространения инфразвуковых волн в атмосферном волноводе. Действительно, в результате вертикальных смещений земной поверхности в эпицентральной области очагов землетрясений возникают волновые возмущения в атмосфере [Гармаш и др., 1989; Голицын, Кляцкин, 1967; Cook, 1971]. Возмущения в виде инфразвукового сигнала распространяются на значительные расстояния и отчетливо проявляются в микробарических вариациях [Адушкин и др., 2021]. В данной работе регистрация инфразвуковых сигналов выполнялась в ЦГМ на расстоянии $R \sim 2060$ км от эпицентральной области наиболее сильного землетрясения с $M = 7.8$.

В нашем случае приход сейсмических волн в ЦГМ от двойного землетрясения (1 и 2 из табл. 1) зафиксирован в $\sim 01:22$ UTC [Адушкин и др., 2023]. При этом приход группы поверхностных волн зарегистрирован в $\sim 01:25$ UTC. Характер инфразвукового сигнала, вызванного сейсмическими волнами от этих событий, демонстрирует рис. 2

в виде зависимости давления в волне P от времени t . Из рис. 2 следует, что сигнал отчетливо проявляется на фоне микробарического шума. При этом максимальная амплитуда сигнала составляет ~ 0.5 Па и достигается в период прохождения поверхностных сейсмических волн. Аналогичным образом выглядит акустический сигнал, вызванный приходом сейсмических волн от землетрясения 3 из табл. 1.

Инфразвуковой сигнал, вызванный событиями 1 и 2 и распространяющийся по атмосферному волноводу, зарегистрирован в ЦГМ в 03:28:11 UTC. Форма этого сигнала приведена на рис. 3. Характер записи может свидетельствовать о сложной картине суперпозиции волновых форм сигналов, вызванных последовательно произошедшими событиями 1 и 2.

Инфразвуковой сигнал от землетрясения 3 из табл. 1, распространяющийся по атмосферному волноводу, зарегистрирован в ЦГМ в $\sim 12:11:58$ UTC (рис. 4).

С учетом времен регистрации инфразвуковых сигналов, распространяющихся по атмосферному волноводу, и расстояний между очагами землетрясений и пунктом регистрации (ЦГМ) получаем: скорость распространения инфразвуковых сигналов составляет 260–300 м/с, что соответствует диапазону скоростей распространения инфразвуковых волн, распространяющихся в атмосферном волноводе [Куличков и др., 2004].

5. МАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ

Известно, что сильные землетрясения вызывают вариации магнитного поля Земли [Адушкин и др., 2021; Спивак, Рябова, 2019; Черногор, 2019; Iyemori et al., 2005; Hattory, 2004; Takla et al., 2009; Utada, 2011; и др.]. Особый интерес представляет магнитный эффект, регистрируемый через небольшой промежуток времени (5–7 мин) после основного толчка, в основном, при землетрясени-

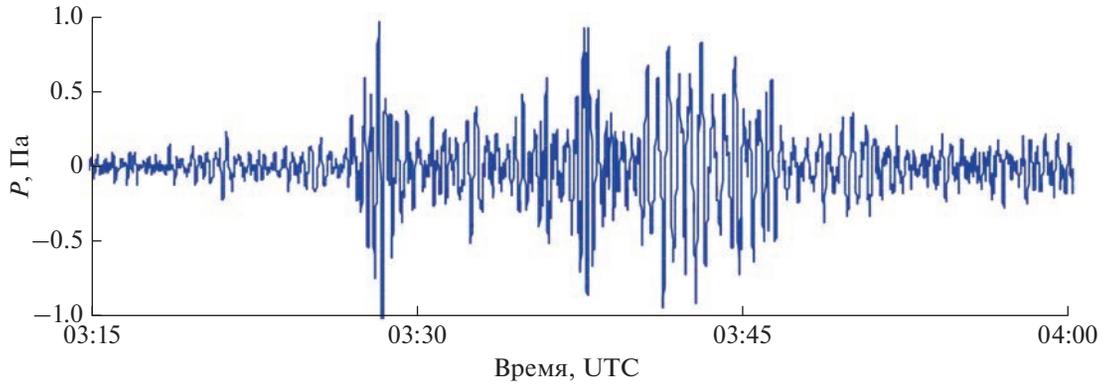


Рис. 3. Распространяющийся по атмосферному волноводу инфразвуковой сигнал, вызванный двойным землетрясением 1 и 2 из табл. 1 (по данным ЦГМ).

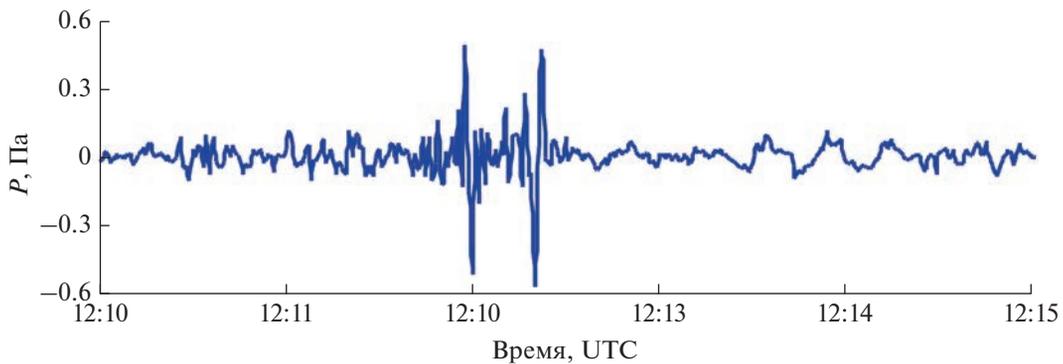


Рис. 4. Запись инфразвукового сигнала, вызванного землетрясением 3 из табл. 1, и распространяющегося по атмосферному волноводу (по данным ЦГМ).

ях континентального типа, причем на значительных эпицентральных расстояниях от очага землетрясения [Адушкин, Спивак, 2021; Спивак, Рябова, 2019]. Предполагается, что наиболее вероятным механизмом этого эффекта является возбуждение ионосферы в эпицентральной области землетрясения при воздействии на нее атмосферными возмущениями (прежде всего акустико-гравитационными волнами), возникающими в результате вызванных движений земной коры [Адушкин, Спивак, 2021; Гохберг, Шалимов, 2008; Дубров, Смирнов, 2003; Колесник, Пикалов, 2010; Перевалова и др., 2016; Шалимов, 2018; Шалимов и др., 2017; Науакawa, 1999; Hegai et al., 2015]. Именно в этом случае возможно быстрое распространение магнитных возмущений на значительные расстояния.

В настоящей работе основное внимание уделено длиннопериодным вариациям магнитного поля¹, вызванным двойным землетрясением (1 и

2 из табл. 2). Анализ данных, полученных при выполнении инструментальных наблюдений, свидетельствует о том, что рассматриваемые землетрясения сопровождались вариациями магнитного поля. На рис. 5 приведены примеры геомагнитных вариаций, вызванных двойным землетрясением, в виде $B_x(t)$. Из рис. 5 следует, что характер вариаций представляет собой хорошо выраженную достаточно продолжительную по времени отрицательную бухту. При этом вне зависимости от расстояния R длительность вариаций примерно одинакова и составляет ~ 3.5 ч. Максимальные амплитуды вариаций компоненты B_x относительно тренда B^* также находятся в узком диапазоне: от 14 до 22 нТл (табл. 3).

Особо следует отметить, что в случае двойного землетрясения отмечается высокая синхронность магнитных возмущений: начало вызванных геомагнитных вариаций в широком диапазоне расстояний от ~ 1230 до 9690 км отмечается практически в одно и то же время $\sim 02:10$ UTC. Этот факт свидетельствует о высокой вероятности наличия единого глобального источника возмущений.

¹ Короткие вариации магнитного поля в период сразу после двойного землетрясения 1 и 2 рассмотрены в работе [Adushkin, Spivak et al., 2023].

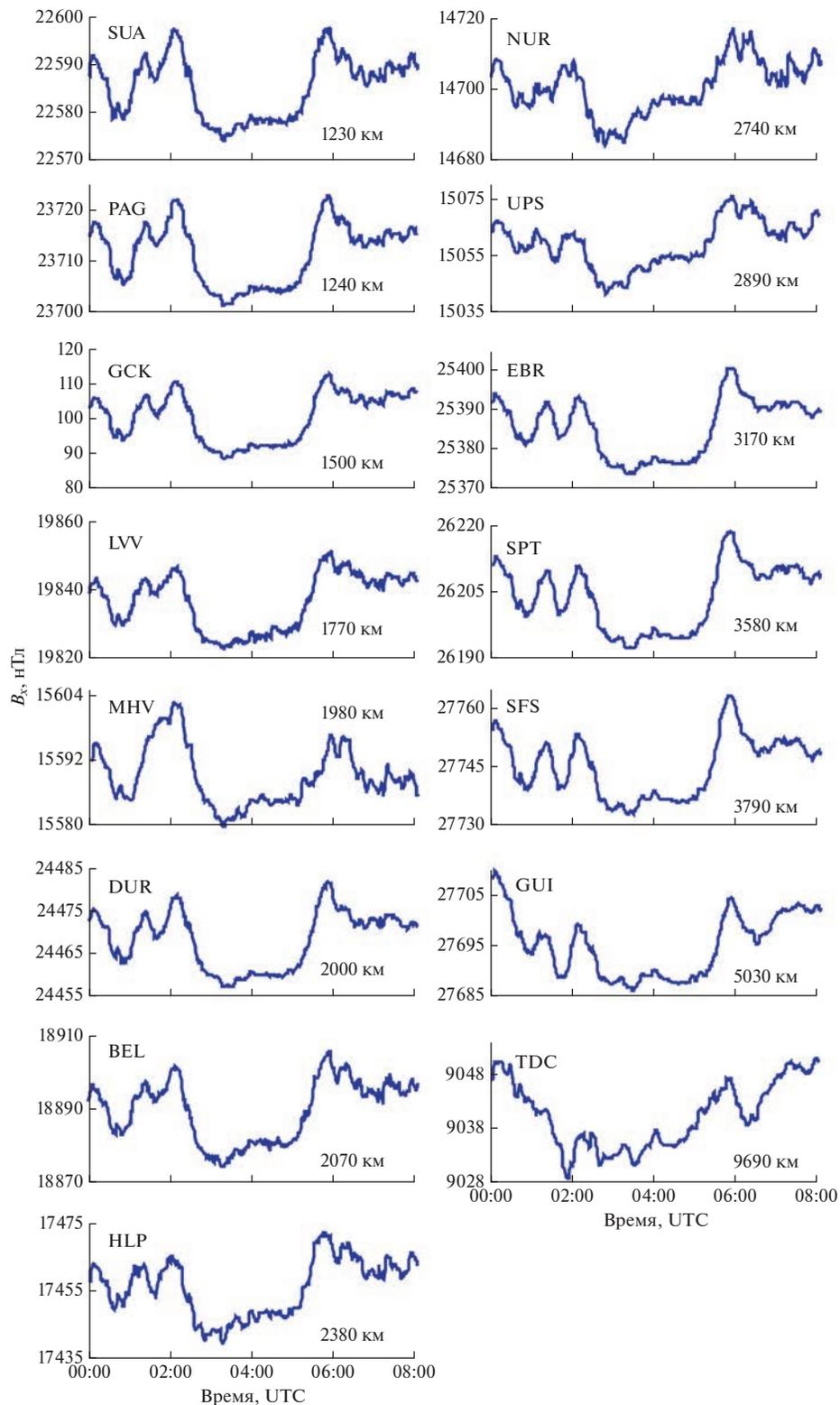


Рис. 5. Геомагнитные вариации в магнитных обсерваториях, расположенных на разных расстояниях R от очага землетрясения 1 из табл. 1 INTERMAGNET (расстояние R указано в поле рисунков).

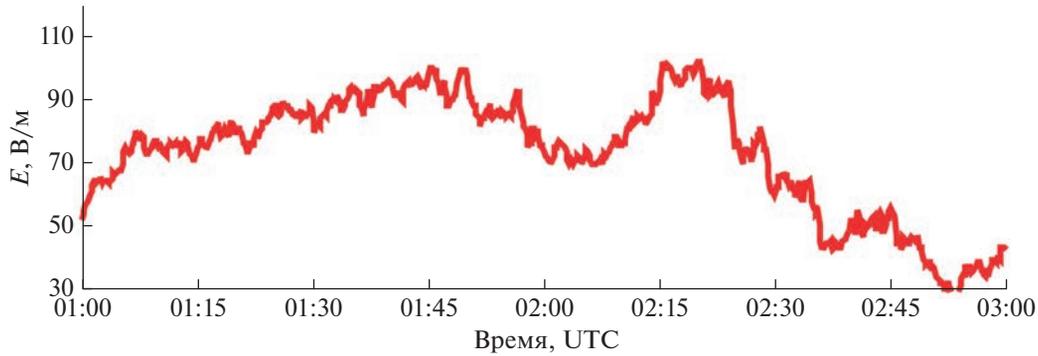


Рис. 6. Вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля в МНУ, вызванные двойным землетрясением.

С учетом времени запаздывания, составившего ~53 мин относительно главного удара события 1 и сопоставимого со временем двойного пробега сейсмическим сигналом расстояния, равного размеру Земли, а также узкого диапазона вариаций B^* можно предполагать, что источником геомагнитных вариаций в данном случае является геодинамо, возмущенное в результате распространения вглубь Земли сейсмических волн от двух практически одновременно произошедших землетрясений при их сложении.

6. ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Электрический эффект землетрясений является одним из интересных [Рябова, Спивак, 2020]. Его изучение имеет как фундаментальное, так и практическое значение, что связано с возрастающей необходимостью разработки новых методов и способов описания свойств земной коры и диагностики ее геодинамического состояния. По отклику на землетрясения в виде генерации электрических сигналов можно судить о свойствах твердой среды, действующих напряжениях и характере деформаций [Mikhailov et al., 1997; Zhu, Toksoz, 2005]. Особое значение это имеет при характеристике современного состояния сейсмоактивных районов и потенциала разломных зон [Соловьев, Спивак, 2009; Thompson, Gist, 1993].

Электрические эффекты землетрясений могут быть связаны с механоэлектрическими процессами, сопровождающими деформирование и разрушение горных пород непосредственно перед и во время главного толчка [Gyulai, Hartly, 1928; Molchanov, Nayakawa, 2008]. Электрические аномалии могут быть также связаны, например, с образованием электрически заряженных областей в фрагментированной горной породе, порождающих дополнительное электрическое поле в атмосфере, либо с влиянием интенсивных деформаций на проводимость флюидов, заполняющих

поры и трещины в горных породах [Алексеев, Аксенов, 2003; Моргунов, Мальцев, 2003; Соловьев, Спивак, 2006; 2009].

Следует отметить, что в настоящее время не существует общепринятого объяснения электрическим эффектам, регистрируемым непосредственно перед землетрясением, и особенно в период основного толчка [Руленко и др., 1996; Kachakhidze, 2000]. В этой связи остаются актуальными инструментальные исследования, направленные на установление отклика атмосферного электрического поля на землетрясения.

Результаты инструментальных наблюдений, выполненных в МНУ в период рассматриваемых сейсмических событий, свидетельствуют о наличии вызванных вариаций вертикальной компоненты электрического поля в приземной атмосфере на значительном расстоянии $R \sim 1980$ км. Вариации E , вызванные двойным землетрясением, приведены на рис. 6, из которого следует, что спустя примерно 30 мин после сейсмического события наблюдается характерное изменение хода $E(t)$ в виде отрицательной бухты длительностью ~29–35 мин с максимальной амплитудой ~20 В/м.

Вариации электрического поля наблюдались также в период прохождения инфразвукового сигнала через точку регистрации. На рис. 7 приведены вариации напряженности электрического поля относительно тренда E^* в период прихода инфразвукового сигнала, вызванные двойным землетрясением, в ЦГМ.

7. ВАРИАЦИИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F_2 ИОНОСФЕРЫ

Представляет интерес рассмотрение влияния рассматриваемых землетрясений на ионосферу. В частности, в настоящей работе проведен анализ поведения ионосферы в области максимума слоя F_2 после основного события в виде двойного землетрясения 1 и 2. С этой целью выполнялась оценка критической частоты f_0F_2 в период двой-

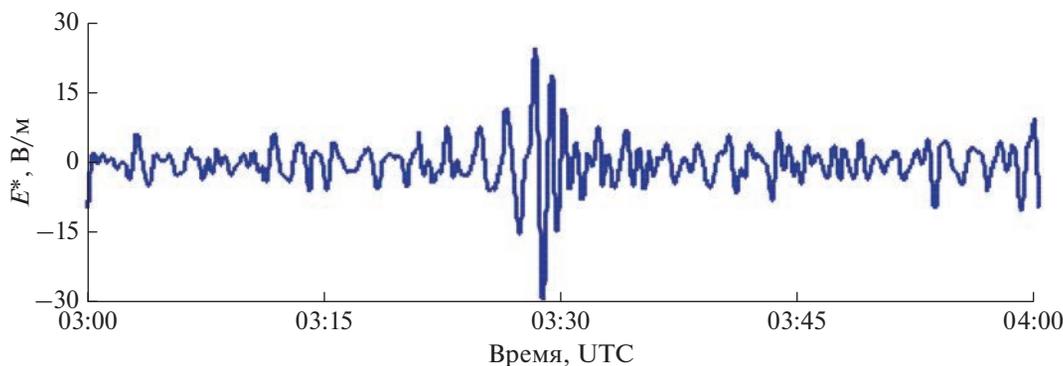


Рис. 7. Вариации электрического поля в период прохождения инфразвукового сигнала через ЦГМ.

ного землетрясения с использованием ионограмм Национальной обсерватории “Афины”, расположенной на эпицентральной расстоянии ~ 1200 км от очага события 1 (табл. 1).

Зондирование на станции выполнялось каждые 5 мин с помощью ионозонда DPS-4D (мощность передатчика 300 Вт, диапазон зондируемых частот 1–30 МГц, длительность зондирующего импульса 533 мкс [Reinisch, 2007]). В процессе анализа данных инструментальных наблюдений каждая ионограмма подвергалась ручной обработке и интерпретации по методике URSI [Руководство ..., 1977]. В результате был сформирован цифровой ряд данных временной вариации критической частоты F_2 -слоя f_0F_2 с дискретизацией 5 мин.

Ионосферный эффект двойного землетрясения в виде вариаций критической частоты f_0F_2 представлен на рис. 8, из которого следует, что сейсмические события 1 и 2 вызвали ярко выра-

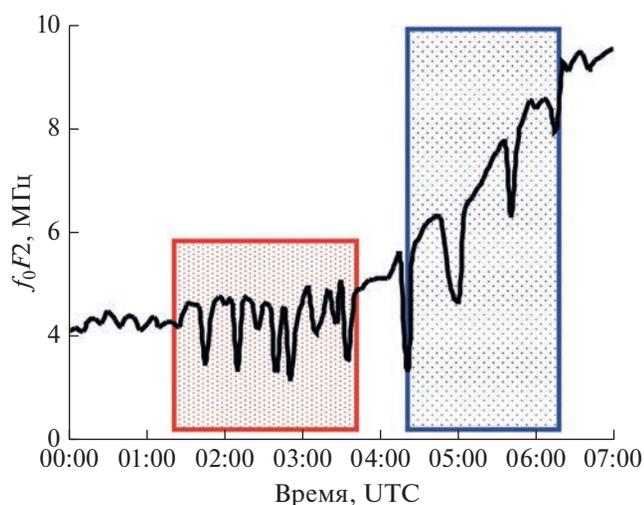


Рис. 8. Вариации критической частоты f_0F_2 , вызванные двойным землетрясением 1 и 2.

женные продолжительные знакопеременные вариации критической частоты f_0F_2 в период с $\sim 01:50$ UTC до $\sim 03:40$ UTC. Период вариаций составил ~ 10 – 15 мин при максимальной амплитуде ~ 1 МГц. Затем, начиная с $\sim 04:20$ UTC, наблюдались знакопеременные вариации критической частоты f_0F_2 с периодом ~ 40 – 45 мин и с максимальной амплитудой ~ 1.5 – 2 МГц. Полная продолжительность ярко выраженных вариаций критической частоты F_2 -слоя составила около четырех часов. Первые по времени из наблюдаемых вариаций можно объяснить ионосферным откликом на волну Релея [Maguyata et al., 2012]. Вторые по времени вариации вероятнее всего связаны с распространением внутренней гравитационной волны [Рябова, Шалимов, 2022].

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в настоящей работе данные дополняют имеющиеся представления о возможных возмущениях геофизических полей в периоды сильных землетрясений. Связанные с динамикой очага движения среды в виде сейсмических волн и вертикальных смещений в его эпицентральной области вызвали заметные возмущения атмосферного микробарического поля на значительном удалении от очага в виде инфразвуковых волн, распространяющихся от эпицентра по атмосферному волноводу, и вариаций давления в период прохождения сейсмического сигнала через точку наблюдений. При этом амплитуды тех и других инфразвуковых возмущений приближаются к 1 Па, что практически на порядок превышает фоновые в рассматриваемом диапазоне частот 0.01–10 Гц и обеспечивает уверенную регистрацию современными средствами.

Отметим, что серия из двух сильных землетрясений с магнитудами 7.8 и 6.7 сопровождалась продолжительным изменением временного хода амплитуды магнитного поля на значительных эпицентральных расстояниях R . В данном случае

представляет особый интерес тот факт, что вызванные геомагнитные вариации зарегистрированы практически синхронно на значительно отличающихся расстояниях R из диапазона 1230–9690 км, причем с близкими амплитудами. Это позволяет сделать осторожный вывод о возможном влиянии на магнитное поле Земли единого источника, возбужденного сейсмическим событием, например, магнитного динамо Земли (здесь следует отметить, что сейсмическая энергия рассматриваемого двойного землетрясения 1 и 2 (табл. 1) соответствует по величине энергии достаточно сильной магнитной бури, расходуемой на формирование кольцевого тока, джоулев нагрев верхней атмосферы и ее ионизацию потоками высыпающих частиц [Новиков, 2006]). В этой части результаты настоящей работы свидетельствуют о необходимости проведения целенаправленных исследований, связанных с установлением возможного источника возмущений магнитного поля Земли, особенно в случаях двойных сильных землетрясений, когда их влияния на среду могут суммироваться.

Данные настоящей работы в очередной раз подтверждают наличие электрического эффекта сильных землетрясений. В данном случае наряду с сейсмoeлектрическим эффектом в период прохождения сейсмических волн через точку наблюдений зарегистрированы достаточно высокие по амплитуде (~ 20 В/м) вариации электрического поля через ~ 30 мин после сильного сейсмического события, причем на значительном расстоянии от его очага (~ 2000 км), что свидетельствует о возникновении достаточно мощного возмущающего источника. Дальнейшие исследования в этой части должны быть связаны с установлением конкретных механизмов преобразования энергии землетрясения в энергию электрического поля, причем с учетом особенностей развития сейсмического события и возможной суперпозиции воздействия близких по времени землетрясений.

Вопрос о влиянии землетрясений на ионосферу не нов [Перевалова и др., 2016; Пулинец и др., 2019; и др.]. В частности, рассматривалось влияние землетрясений на значение критической частоты регулярного F_2 -слоя ионосферы f_0F_2 [Negai et al., 2011]. В настоящей работе продемонстрированы вариации f_0F_2 , вызванные сильным двойным сейсмическим событием. При этом выделено два типа отклика f_0F_2 с разными периодами знакопеременных вариаций.

По мнению авторов, приведенные данные могут представлять интерес для описания эффектов Турецких землетрясений 06.02.2023 г., а в целом при совершенствовании известных и разработке новых моделей влияния землетрясений на окружающую геофизическую среду и их верификации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 122032900185-5 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю. “Михнево”: от сейсмической станции № 1 до современной геофизической обсерватории // Физика Земли. 2016. № 1. С. 108–120.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Воздействие экстремальных природных событий на геофизические поля в среде обитания // Физика Земли. 2021. № 5. С. 6–16.
- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов. М.: ГЕОС. 2021. 264 с.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Эффект влияния сильных землетрясений на геодинамо // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 1. С. 61–64.
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Тихонова А.В. Серия катастрофических землетрясений в Турции 06.02.2023 г. и возмущение геофизических полей // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 510. № 2. С. 105–110.
- Алексеев А.С., Аксенов В.В. Об электрическом поле в очаговой зоне землетрясений // Докл. РАН. 2003. Т. 392. № 1. С. 106–110.
- Гармаш С.В., Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Швед Г.М. Возбуждение колебаний атмосферы сейсмогравитационными колебаниями Земли // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. № 12. С. 1290–1299.
- Голицын Г.С., Кляцкин В.И. Колебания в атмосфере, вызванные движением земной поверхности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1967. № 10. С. 1044–1052.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука. 2008. 295 с.
- Дубров М.Н., Смирнов В.М. Взаимосвязанные возмущения земной поверхности, атмосферы и ионосферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 53. № 1. С. 53–63. 2003.
- Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 264 с.
- Колесник С.А., Пикалов М.В. Механизм воздействия инфразвука на вариации магнитного поля Земли // Известия высших учебных заведений. Физика. Т. 53. № 9/3. Томск: ТГУ. 2010. С. 268–269.
- Куличков С.Н., Авилов К.В., Буш Г.А. и др. Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 3–12.
- Моргунов В.А., Мальцев С.А. Модель квазистационарного электрического поля литосферной природы. Пятая Российская конф. по атмосферному электричеству. 22–26 сентября 2003 г., Владимир. Владимир: изд-во Транзит ИКС. 2003. Т. 2. С. 59–61.
- Новиков Л.С. Основы экологии околоземного космического пространства. М.: Университетская книга. 2006. 84 с.

- Перевалова Н.П., Шестаков Н.В., Воейков С.В., Быков В.Г., Герасименко М.Д., Парк Р.Н. Исследование распространения ионосферных возмущений, вызванных землетрясением Тохоку, в дальней от очага зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 186–196.
- Пулинец С.А., Хегай В.В., Легенька А.Д., Корсунова Л.П. Эффекты в ионосфере после Чилийского землетрясения 27.02.2010 г. по данным наземных ионозондов // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 5. С. 671–680.
- Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9–27.
- Руленко О.П., Дружин Г.И., Вершинин Е.Ф. Измерения атмосферного электрического поля и естественного электромагнитного излучения перед камчатским землетрясением 13.11.1993 $M = 7.0$ // Докл. РАН. 1996. Т. 348. № 6. С. 814–816.
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / П.В. Медникова (ред.). М.: Наука. 1977. 342 с.
- Рябова С.А., Шалимов С.Л. О геомагнитных вариациях, наблюдаемых на поверхности земли и приуроченных к сильным землетрясениям // Физика Земли. 2022. № 4. С. 30–45.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В. О зависимости землетрясения от объема сейсмического очага // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271. № 3. С. 598–602.
- Соловьев С.П., Спивак А.А. Электромагнитные эффекты как следствие неоднородного строения и дифференциальных движений в земной коре. Динамические процессы во взаимодействующих геосферах. М.: ГЕОС. 2006. С. 196–204.
- Соловьев С.П., Спивак А.А. Электромагнитные сигналы в результате электрической поляризации при стесненном деформировании горных пород // Физика Земли. 2009. № 2. С. 34–48.
- Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А. Аппаратура и методика для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 2. С. 65–78.
- Спивак А.А., Рябова С.А. Геомагнитные вариации при сильных землетрясениях // Физика Земли. 2019. № 6. С. 3–12.
- Черногор Л.Ф. Геомагнитные возмущения, сопровождавшие Великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 1. С. 69–82.
- Шалимов С.Л. Атмосферные волны в плазме ионосферы (с геофизическими примерами). М.: ИФЗ РАН. 2018. 390 с.
- Шалимов С.Л., Нестеров И.А., Воронцов А.М. О возмущениях ионосферы, регистрируемых посредством GPS, после землетрясения и цунами в Тохоку 11.03.2011 г. // Физика Земли. 2017. № 2. С. 97–108.
- Cook R.K. Infrasonic re-radiated during the Montana earthquake of 1959. August 18 // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1971. V. 26. P. 191–198.
- Iyemori T., Nose M., Han D., Gao J., Hashizume M., Choo-sakul N., Shinagawa H., Tanaka J., Utsugi M., Saito A., Mccreadie H., Odagi J., Yang F. Geomagnetic pulsations caused by the Sumatra earthquake on December 26, 2004 // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32. P. L20807. <https://doi.org/10.1029/2005GL024083>
- Gyulai Z., Hartly D. Elektrische leitfähigkeit verformer steinsalzkristalle // Zeitschrift für Physik. 1928. V. 51. № 5–6. P. 378–387.
- Hattori K. ULF Geomagnetic changes associated with large earthquakes // Terrestrial, Atmospheric and Ocean Sciences. 2004. V. 15. № 3. P. 329–360.
- Hayakawa M. Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes. Tokyo. TERRAPUB. 1999. 996 p.
- Hegai V.V., Legen'ka A.D., Kim V.P., Gtorgieva K. Wave-like perturbations in the ionospheric F2-layer observed after the Ms 8.1 Samoa earthquake of September 29, 2009 // Advances in Space Research. 2011. V. 47. № 11. P. 1979–1982.
- Hegai V.V., Kim V.P., Liu J.Y. On a possible seismomagnetic effect in the topside ionosphere // Advances in Space Research. 2015. V. 56. № 8. P. 1707–1713.
- Kachakhidze N. Electrical field potential gradient of atmosphere as a possible precursor of earthquakes // Bulletin of Georgian Academy of Sciences. 2000. V. 161. № 3. P. 32–43.
- Mikhailov O.V., Haartsen M.V., Toksoz M.N. Electrostatic investigation of the shallow subsurface: field measurements and numerical modeling // Geophysys. 1997. V. 62. P. 97–105.
- Maruyama T., Tsugawa T., Kato H., Ishii M., Nishioka M. Rayleigh wave signature in ionograms induced by strong earthquakes // J. Geophysical Research: Space Physics. 2012. V. 117. P. A08306. <https://doi.org/10.1029/2012JA017952>
- Molchanov O.A., Hayakawa M. Seismo-electromagnetics and related phenomena. History and latest results. Tokyo: TERRAPUB, 2008. 189 p.
- Reinisch B. The digisonde portable sounder – DPS. Technical manual. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research. 2007. Version 4.3. 404 p. https://www.digisonde.com/pdf/Digisonde4DManual_LDI-web.pdf
- Takla E.M., Yumoto K., Liu J.Y., Kakinami Y., Uozumi T., Abe S., Ikeda A. Anomalous geomagnetic variations possibly linked with the Taiwan earthquake on 19 December 2009 // Int. J. Geophys. 2011. Article ID 848467. <https://doi.org/10.1155/2011/848467>
- Thompson A.H., Gist G.A. Geophysical applications of electrokinetic conversion // The leading Edge. 1993. V. 12. P. 1160–1173.
- Utada H., Shimizu H., Ogawa T., Maeda T., Furumura T., Yamamoto T., Yamazaki N., Yoshitake Y., Nagamachi S. Geomagnetic field changes in response to the 2011 of the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami // Earth and Planetary Science Letters. 2011. V. 311. P. 11–27.
- Zhu Z., Toksoz M.N. Seismoelectric and seismomagnetic measurements in fractured borehole models // Geophys. 2005. V. 70. F45–F51.

Geophysical Effects of a Series of Strong Earthquakes in Turkey of February 6, 2023

V. V. Adushkin^a, Yu. S. Rybnov^a, S. A. Riabova^a, A. A. Spivak^{a, *}, and A. V. Tikhonova^a

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

**e-mail: aaspivak100@gmail.com*

Abstract—During a series of destructive earthquakes in Turkey on February 6, 2023, in particular, two strong earthquakes with magnitudes 7.8 and 6.7 immediately following each other, the results of instrumental observations of microbaric and geomagnetic variations made in the surface layer of the atmosphere, as well as variations of the electric field and the critical frequency of the regular $F2$ layer of the ionosphere are presented. It is shown that the earthquakes were accompanied by variations of magnetic and electric fields, generation of infrasound waves recorded at a considerable distance from the sources, as well as variations of the critical frequency f_0F2 .

Keywords: earthquake, infrasound, magnetic field, electric field, ionosphere, critical frequency, variation