

## МАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ДВОЙНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 16.03.2022 Г. (ЯПОНИЯ). РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2023 г. В. В. Адушкин<sup>1</sup>, А. А. Спивак<sup>1</sup>\*, Д. Н. Локтев<sup>1</sup>, Ю. С. Рыбнов<sup>1</sup>, А. В. Тихонова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: aaspivak100@gmail.com

Поступила в редакцию 17.01.2023 г.

После доработки 27.02.2023 г.

Принята к публикации 04.03.2023 г.

Рассмотрены магнитные эффекты сильных землетрясений на примере уникального события: двух подводных землетрясений магнитудой 6.0 и 7.3, произошедших 16.03.2022 г. в близкие времена (соответственно в 14:34 и 14:36 UTC) с расстоянием между очагами ~11 км. С привлечением данных геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН (MHV) и ряда магнитных обсерваторий международной сети INTERMAGNET показано, что в отсутствие глобальных геомагнитных возмущений землетрясения сопровождались характерными вариациями магнитного поля Земли, зарегистрированными в виде цуга знакопеременных колебаний геомагнитного поля амплитудой ~2–8 нТл и периодом ~30 мин практически одновременно в ~15:30 UTC всеми магнитными обсерваториями, расположенными на расстояниях от 210 до ~13000 км, а также вариациями в периоды прохождения сейсмического и инфразвукового сигнала в MHV.

*Ключевые слова:* землетрясение, атмосферная волна, ионосфера, магнитное поле, вариация.

DOI: 10.31857/S0002333723050010, EDN: VZETQC

### ВВЕДЕНИЕ

Землетрясениям, в первую очередь, сильным, сопутствует ряд геофизических эффектов в виде подвижек и деформации горных пород, изменения напряженно-деформированного состояния среды и ее электрофизических свойств, изменения режима подземных вод, увеличение объемной активности эсхалирующего радона и т.д. Особый интерес вызывают геофизические эффекты, вызванные сильными сейсмическими событиями, и, в первую очередь, магнитный эффект, проявляющийся в повышенных вариациях магнитного поля Земли [Адушкин и др., 2021; Спивак, Рябова, 2019; Черногор, 2019; Iyemori et al., 2005; Hattory, 2004; Liu et al., 2006; Takla et al., 2009; Utada, 2011; и др.]. Несмотря на значительное количество выполненных исследований, в настоящее время отмечается недостаток как в обобщающих представлениях, касающихся влияния землетрясений на геомагнитное поле, так и в количественных характеристиках их магнитного эффекта, полученных в результате инструментальных наблюдений.

В большей степени это связано со сложностью явления. Действительно, результаты измерений свидетельствуют о том, что вариации магнитного поля Земли наблюдаются не только в период основного толчка, но также в период прихода сей-

смического сигнала (сейсмомагнитный эффект) [Гульельми и др., 2002; Мигунов, Соболев, 2006; Саломатин, Сурков, 2000; Тихонов, 2011; Цэгмед и др., 2000; Borders et al., 2008; Fraser-Smith, 2008; Hayakawa, 2011] (здесь следует добавить, что сейсмомагнитный эффект существенно усиливается при распространении сейсмических волн через разломные зоны [Адушкин и др., 2017; Ларкина и др., 2001; Кролевец, Шереметьева, 2004]). Особый интерес представляет магнитный эффект, регистрируемый через небольшой промежуток времени (5–7 мин) после основного толчка преимущественно при землетрясениях 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; Hayakawa, 1999; Negai et al., 2015]. Именно в этом случае возможно быстрое распро-

**Таблица 1.** Характеристика землетрясений

№ п/п	Дата	Время (UTC)	Магнитуда	Географические координаты		Глубина, км
				широта	долгота	
1	16.03.2022	14:34:27	6.0	37.647° N	141.674° E	57
2	— “ —	14:36:33	7.3	37.730° N	141.595° E	59

странение магнитных возмущений на значительные расстояния.

В настоящей работе рассмотрен магнитный эффект сильных землетрясений на примере уникального сейсмического события 16.03.2022 г.: двух следующих друг за другом с интервалом ~2 мин подводных землетрясений, расстояние между центрами очагов которых оценивается в ~11 км. Основные характеристики указанных землетрясений, произошедших на достаточно небольшом по сейсмологическим меркам расстоянии (~90 км) от очага Великого Японского землетрясения (Тохоку; 11.03.2011 г.;  $M \sim 9.1$ ), механизм которого хорошо изучен [Рогожин, 2011; Тихонов, Ломтев, 2011; Черногор, 2019], приведены в табл. 1.

Согласно устоявшимся представлениям [Касахара, 1985; Садовский и др., 1983; 1989] при объемной плотности сейсмической энергии в очаге землетрясения, составляющей  $\sim 10^2$  Дж/м<sup>3</sup> в широком диапазоне магнитуд, линейные размеры зон разгрузки напряжений составляют для событий 1 и 2 из табл. 1 соответственно ~10 и ~50 км. Это позволяет рассматривать землетрясение 1 в качестве форшока события 2.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных использовались результаты инструментальных наблюдений, выполненных в ГФО “Михнево” (МНВ) ИДГ РАН (GEO: 54.959° N; 37.766° E) и в ряде среднеширотных обсерваторий сети INTERMAGNET, расположенных на разных расстояниях  $R$  от центра очагов двойного землетрясения (табл. 2; рис. 1). Измерение компонент индукции магнитного поля  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$ <sup>1</sup> выполнялось в МНВ с помощью феррозондового цифрового магнетометра LEM1-018, обеспечивающего регистрацию в диапазоне  $\pm 68000$  нТл с разрешением 10 пТл (частота выборки 1 с<sup>-1</sup>). Для анализа использовались ряды цифровых записей магнитного поля, выполненных на земной поверхности, сформированные с дискретностью 1 мин на основе данных сети INTERMAGNET и с дискретностью 2 с на основе данных МНВ.

Регистрация временного хода атмосферного давления  $P_0(t)$  и других метеопараметров, харак-

теризующих состояние атмосферы, выполнялась в МНВ и ЦГМ с помощью автоматизированных цифровых метеостанций Davis Vantage Pro 2.

Необходимые в данном случае микробарические вариации 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  $P_0(t)$  и исходной записи микробарометра в диапазоне частот 0.005–0.1 Гц с учетом расстояния до источника сигнала (~15293 км) и вероятной скорости его распространения в стратосферном волноводе (280–310 м/с) [Куличков, 1987; Куличков и др., 2004].

### ГЕОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

День 16.03.2022 г. характеризовался спокойной магнитной обстановкой (табл. 3), что значительно облегчило анализ геомагнитного эффекта, вызванного рассматриваемыми сейсмическими событиями.

Вызванные в период землетрясений вариации магнитного поля анализировались за вычетом тренда. В качестве примера на рис. 2 приведены суточный ход наиболее чувствительной к внешним возмущениям горизонтальной компоненты магнитного поля  $B_x$  и ее вариации на фоне тренда

$B_x^*$ , зарегистрированные в ближайшей к очагам событий обсерватории КАК (INTERMAGNET). Из рис. 2 следует, что в ~15:30 UTC землетрясения вызвали знакопеременные изменения в суточном ходе  $B_x(t)$  с амплитудой ~3 нТл и периодом ~32 мин.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что аналогичные по форме геомагнитные вариации зарегистрированы всеми другими магнитными обсерваториями, расположенными в субмеридианальном направлении на разных эпицентральных расстояниях  $R$ . В качестве примера на рис. 3 приведены данные, полученные в некоторых других обсерваториях.

Несколько иной характер геомагнитных вариаций наблюдается в магнитных обсерваториях, расположенных в субширотном направлении от

<sup>1</sup> Направление осей координат:  $x$  – С–Ю,  $y$  – В–З,  $z$  – вертикально вниз.

**Таблица 2.** Данные по магнитным обсерваториям

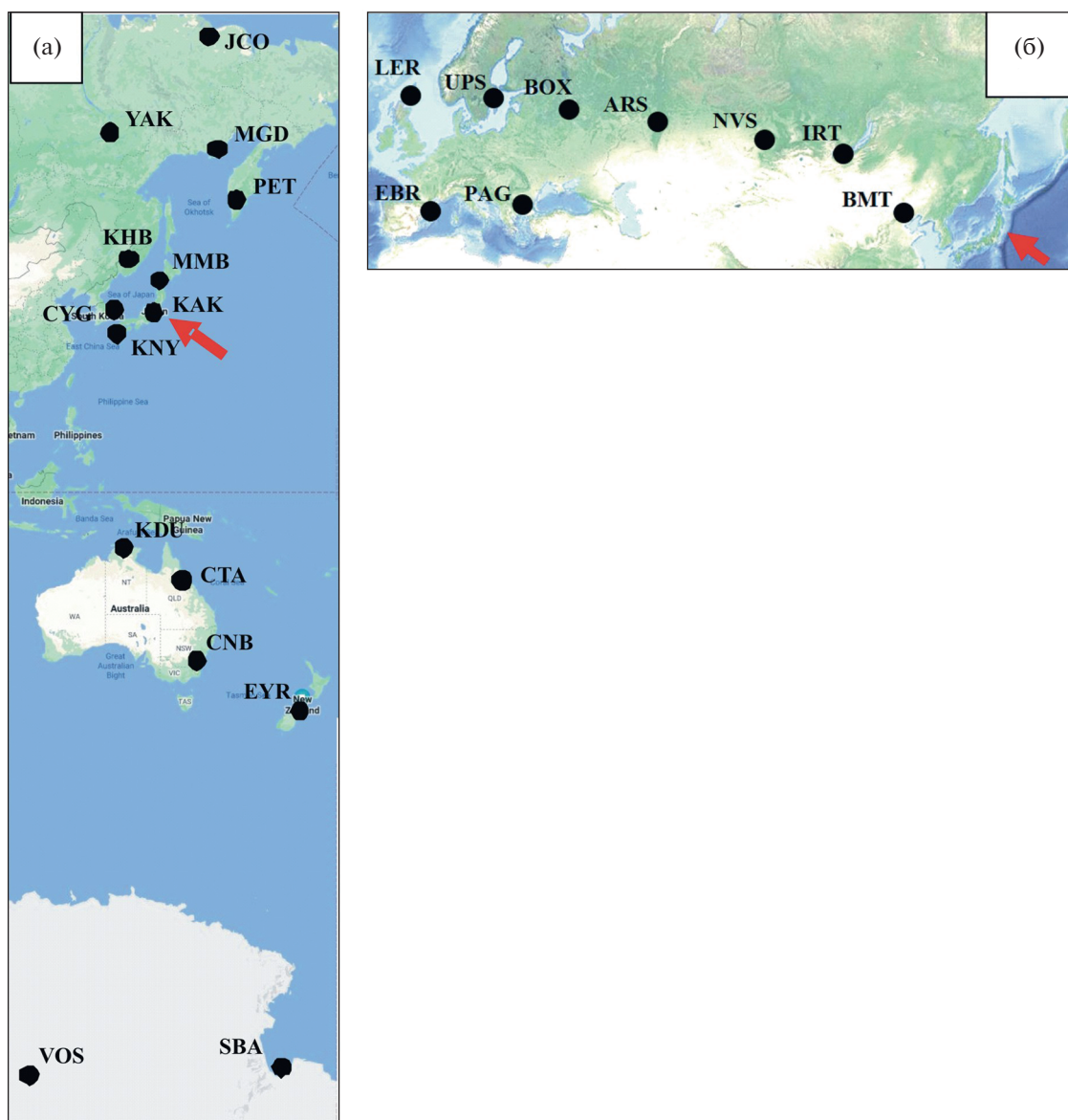
Код	Территория	GEO		R, км	$B_x^*$ , нТл
		широта	долгота		
Обсерватории субмеридианального направления					
КАК	Япония	36.232° N	140.186° E	210	~3
ММВ	Япония	43.91° N	144.19° E	725	~4
KNY	Япония	31.42° N	130.88° E	1205	~8
КНВ	Россия	47.61° N	134.69° E	1240	~5
СУГ	Корея	36.37° N	126.854° E	1320	~4
РЕТ	Россия	52.971° N	158.248° E	2125	~6
МГД	Россия	60.051° N	150.728° E	2570	~8
YAK	Россия	61.960° N	129.660° E	2815	~7
JCO	Россия	70.356° N	148.799° E	3660	~20 (?)
KDU	Австралия	12.69° S	132.47° E	5685	~3
СТА	Австралия	20.090° S	146.264° E	6450	~4
CNB	Австралия	35.32° S	149.36° E	8155	~6
EYR	Нов, Зеландия	43.47° S	172.393° E	9545	~6
SBA	Антарктика	77.85° S	166.762° E	12960	~20 (?)
VOS	Антарктика	78.464° S	106.835° E	13120	~15 (?)
Обсерватории субширотного направления					
ВМТ	Китай	40.300° N	116.200° E	2205	~5
ИРТ	Россия	52.270° N	104.450° E	3285	~5
NVS	Россия	54.850° N	83.230° E	4705	~4
ARS	Россия	56.433° N	58.567° E	6195	~3
ВОХ	Россия	58.070° N	38.230° E	7225	~5
MHV	Россия	54.961° N	37.763° E	7440	~2
UPS	Швеция	59.903° N	17.353° E	8025	~4
LER	Великобритания	60.138° N	1.183° W	8615	~3
PAG	Болгария	42.515° N	24.177° E	9080	~2
EBR	Испания	40.957° N	0.333° E	10420	~2

**Таблица 3.** Индексы магнитной активности  $K_p$  (по данным International Service of Geomagnetic Indices (ISGI)) и  $K$  (по данным MNV) за 16.03.2022 г.

Индекс	Время (UTC)							
	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
$K_p$	1	0	1	1	2	2	2	2
$K$	0	0	0	2	2	3	2	2

землетрясений. Это хорошо видно из рис. 4. В этом случае по сравнению с данными рис. 3 слабо выражена первая положительная бухта геомагнитных вариаций, начало которой зарегистрировано в субмеридианальных обсерваториях в ~15:30 UTC. Вторая бухтообразная положительная вариация хорошо выражена до расстояний ~4700 км и практически отсутствует на больших расстояниях.

Представляет интерес вызванный рассматриваемым событием сейсмомагнитный эффект [Белов и др., 1974; Гульельми, Левшенко, 1994; Мигунов, Соболев, 2006; Bordes et al., 2008; Sgrigna et al., 2004]. На рис. 5 приведены результаты сейсмической регистрации на расстоянии  $R \approx 7440$  км (MHV). Из рис. 5 следует, что приход сейсмических возмущений зарегистрирован в ~14:47 UTC. Основной по амплитуде сейсмический сигнал на-

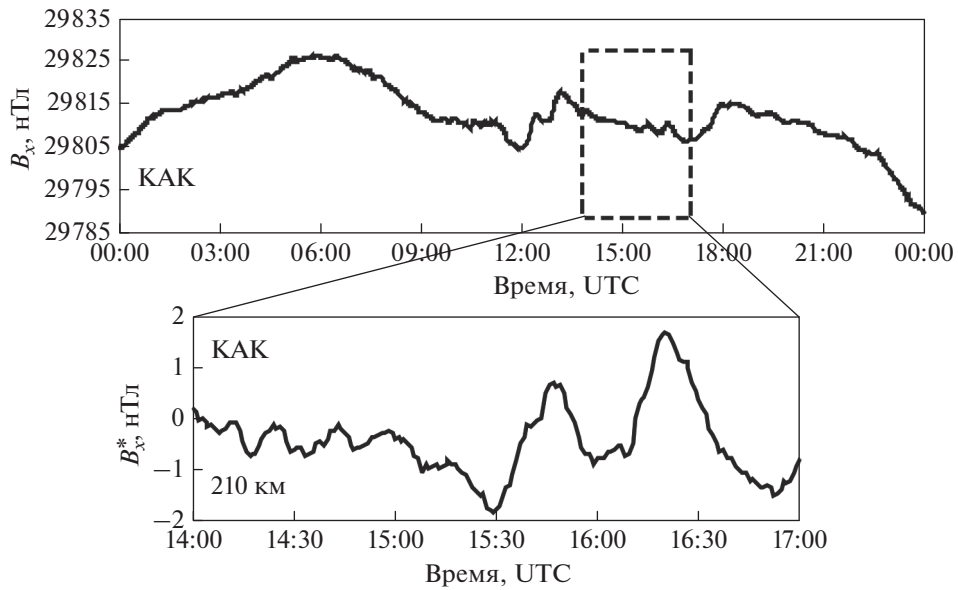


**Рис. 1.** Схема расположения субмеридианальных (а) и субширотных (б) станций сети ИНТЕРМАГНЕТ (красной стрелкой указано место расположения очагов землетрясений).

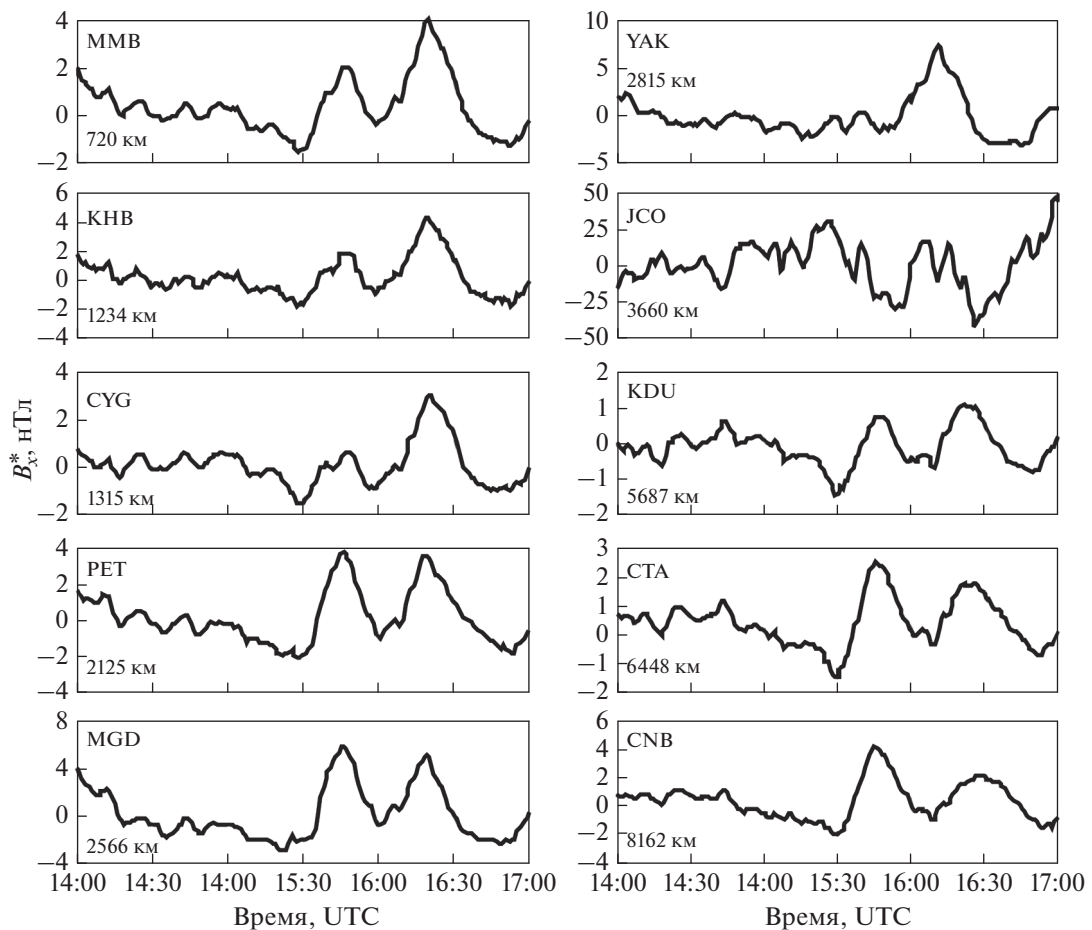
блюдался в течение ~45 мин. Анализ вариаций магнитного поля свидетельствует о том, что практически именно в этот период времени в МНВ зарегистрированы вариации магнитного поля (рис. 6). При этом следует отметить, что характерные знакопеременные изменения геомагнитных вариаций характеризуются условным периодом ~30 мин в то время как наиболее низкочастотные составляющие сейсмического сигнала (группа поверхностных волн) характеризуются значительно меньшим периодом ~40 с. Это можно рассматривать как прямое доказательство того, что зарегистрированные магнитные возмущения не являются аппаратным эффектом при воздействии на магнитометр сейсмических колебаний.

Один из важных эффектов рассматриваемого события связан с формированием в атмосфере инфразвукового сигнала, зарегистрированного на значительном расстоянии от очагов землетрясений (в МНВ,  $R \sim 7440$  км). На рис. 7 приведен вид инфразвукового сигнала, зарегистрированного в МНВ.

Сигнал с характерным периодом ~2.5 мин и максимальной амплитудой ~0.5 Па в ~22:20 UTC отчетливо выделяется на фоне шума (отношение сигнал/шум превышает 4.5). Время прихода сигнала в МНВ ~21:18 UTC, скорость его распространения ~270 м/с, что соответствует диапазону скоростей распространения инфразвуковых волн, рас-



**Рис. 2.** Геомагнитные вариации в обсерватории КАК, вызванные двойным землетрясением 16.03.2022 г. (расстояние до центра очагов событий приведено в поле рисунка); верхняя панель – суточный ход  $B_x$ , нижняя – вариации  $B_x$  за вычетом тренда.



**Рис. 3.** Геомагнитные вариации в обсерваториях INTERMAGNET, расположенных в субмеридианальном направлении от двойного землетрясения 16.03.2022 г. (расстояние до центра очагов событий указано в поле рисунков).

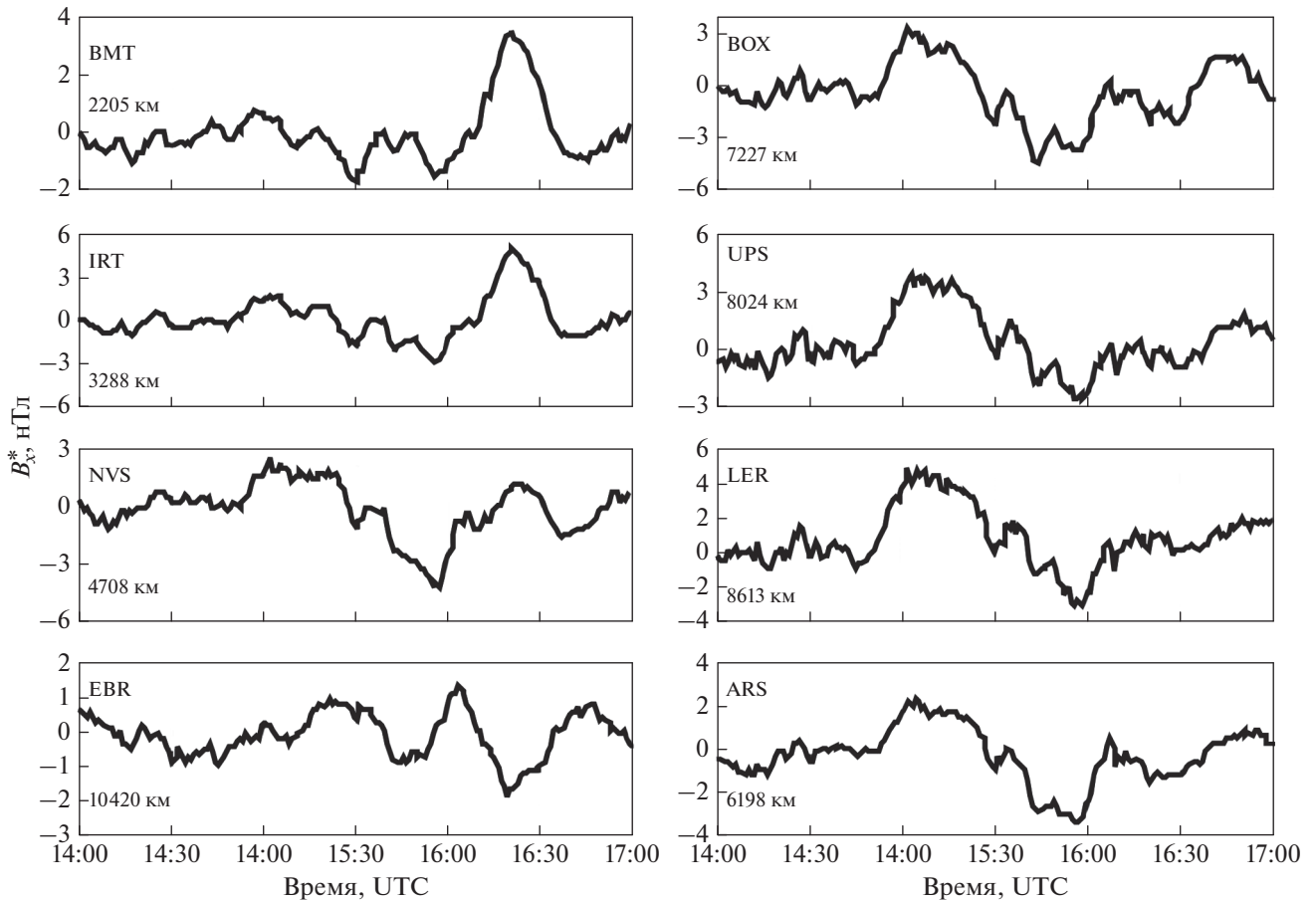


Рис. 4. Геомагнитные вариации в обсерваториях INTERMAGNET, расположенных в субширотном направлении от двойного землетрясения 16.03.2022 г. (расстояние до центра очагов событий указано в поле рисунков).

пространяющихся в атмосферном волноводе [Куличков и др., 2004].

Приход инфразвукового атмосферного возмущения вызвал в данном случае вариацию магнитного поля в виде хорошо выраженной положительной бухты с максимальной амплитудой  $\sim 1.2$  нТл (рис. 8).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассматриваемые землетрясения относятся к океаническому типу. Глубина океана в области очагов составляет порядка  $10^3$  м. В этом случае согласно имеющимся данным [Губкин, 1978; Хргиан, 1978] в эпицентральной области очагов возникают инфразвуковые колебания, но не во всех случаях формируются внутренние гравитационные волны (ВГВ), которые служат триггером геомагнитных вариаций при воздействии на ионосферу. Наличие ВГВ как правило проявляется в сопутствующих землетрясению геомагнитных вариациях, регистрируемых через 5–7 мин после главного удара – времени распространения ВГВ

до ионосферных высот [Адушкин, Спивак, 2021; Дубров, Смирнов, 2003; Черногор, 2015]. Например, землетрясению Тохоку, произошедшему на меньшей глубине ( $\sim 29$  км) и магнитуда которого  $M \approx 9$  существенно превышает магнитуды рассматриваемых землетрясений, при такой же глубине океана сопутствовали ВГВ [Адушкин и др., 2022; Черногор, 2015]. В рассматриваемом случае двойного землетрясения ВГВ не образовались, о чем свидетельствует тот факт, что вариации магнитного поля наблюдались спустя достаточно продолжительное время ( $\sim 55$  мин) после главных ударов. Таким образом, в данном случае отсутствует механизм влияния на ионосферу, связанный с воздействием на нее атмосферных возмущений [Адушкин, Спивак, 2021]. Наблюдаемая высокая синхронность магнитных возмущений в период после главных ударов в широком диапазоне расстояний  $R$  от 210 до  $\sim 13000$  км свидетельствует в данном случае о наличии глобального возмущающего источника<sup>2</sup>. Об этом также свидетельствует узкий диапазон амплитуд магнитных возмущений, вызванных рассматриваемым собы-

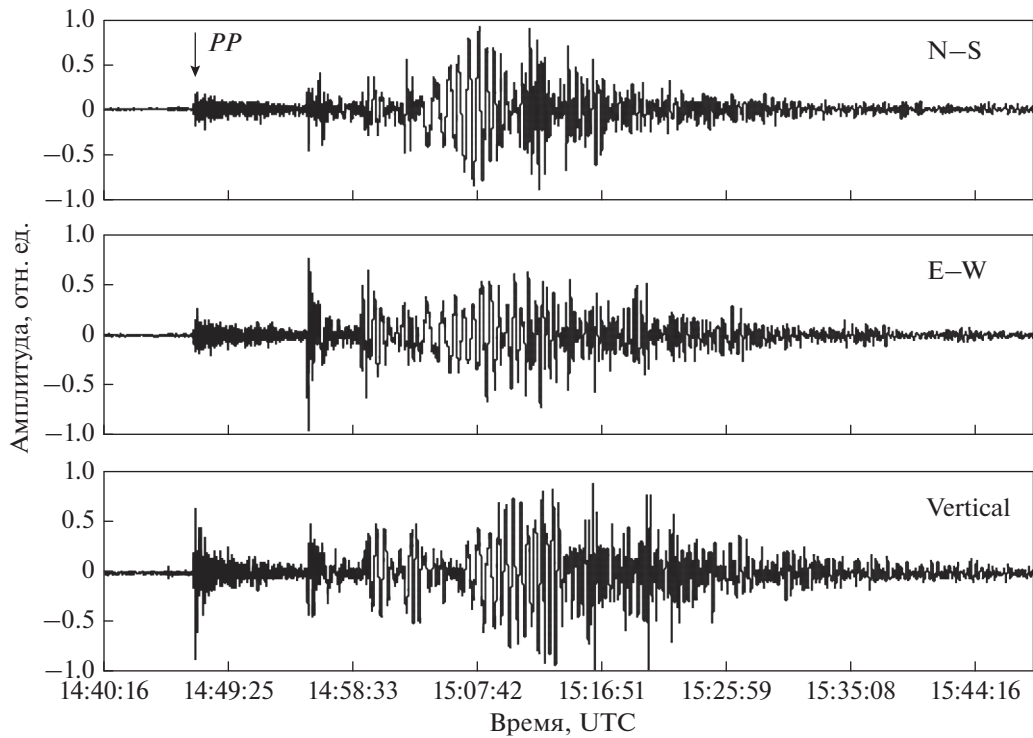


Рис. 5. Горизонтальные компоненты сейсмического сигнала, вызванного двойным землетрясением (пунктир — группа поверхностных волн).

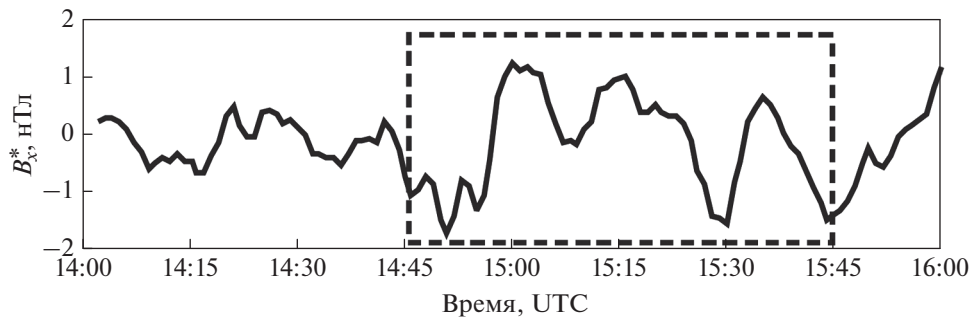


Рис. 6. Геомагнитные вариации в МНВ, в период прихода сейсмического сигнала (пунктиром выделен период вызванных вариаций).

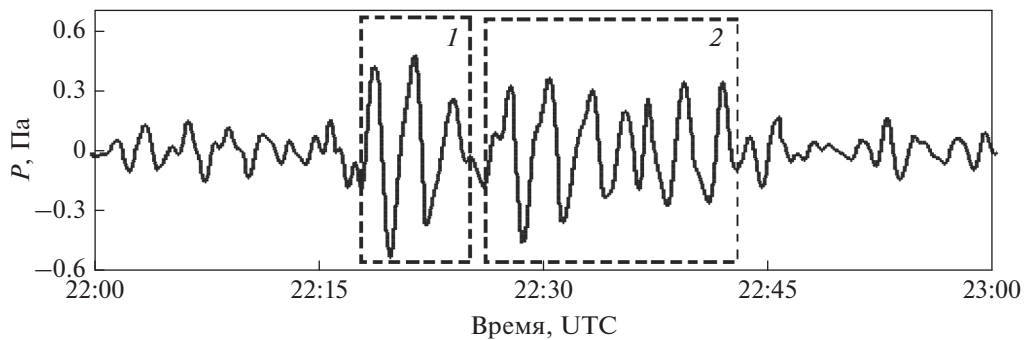
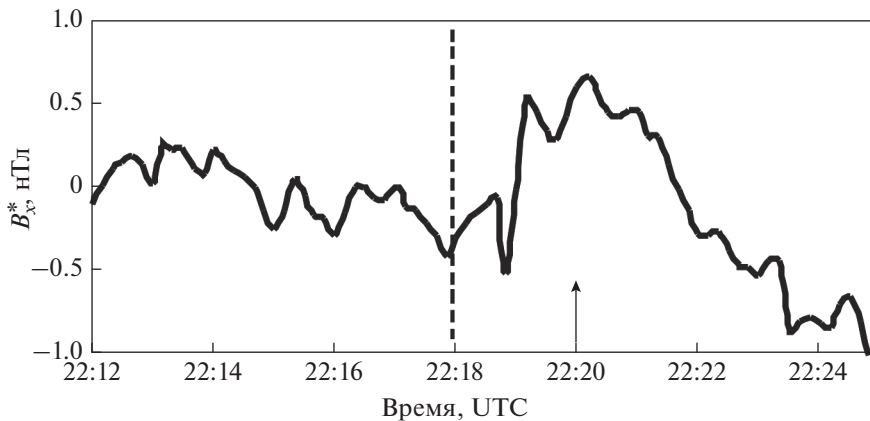


Рис. 7. Инфразвуковой сигнал по данным МНВ (1 — сигнал от первого землетрясения; 2 — сигнал от второго землетрясения).





**Рис. 8.** Геомагнитные вариации, вызванные приходом в MNV инфразвукового сигнала; пунктир и вертикальная стрелка – соответственно время прихода и время достижения максимальной амплитуды инфразвукового сигнала.

тием на всех рассмотренных расстояниях (по данным основного количества обсерваторий (табл. 2) этот диапазон заключен в интервале 2–8 нТл)<sup>3</sup>.

Наблюдаемые в настоящей работе вариации магнитного поля в периоды прихода сейсмического и инфразвукового сигналов отмечались и ранее [Адушкин, Спивак, 2014; Адушкин и др., 2020; 2021]. Правда, здесь необходимо подчеркнуть, что практически все из предлагаемых механизмов возбуждения геомагнитных вариаций указанными источниками до настоящего времени остаются не до конца проработанными [Адушкин и др., 2014; 2020; 2021; Гульельми, Рубан, 1990; Гульельми, 2008].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящей работе данные свидетельствуют о том, что сильные подводные землетрясения оказывают заметное влияние на вариации геофизических полей, в частности, на магнитное поле Земли в весьма широком диапазоне эпицентральных расстояний. При этом следует различать глобальные геомагнитные вариации в период, близкий к главному удару, и в период прохождения сейсмических волн и инфразвуковых сигналов через пункт, в котором выполняются инструментальные наблюдения.

Данные настоящей работы свидетельствуют о том, что влияние сильных землетрясений на магнитное поле Земли представляет собой сложную

многопараметрическую задачу, которая требует более тщательного рассмотрения с формулировкой основных исходных данных для разработки феноменологических и численных моделей, адекватно описывающих результаты инструментальных наблюдений.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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., Харламов В.А. Особенности сейсмамагнитного эффекта в зоне влияния разлома // Докл. РАН. 2014. Т. 454. № 5. С. 590–593.
- Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А. Сейсмамагнитный отклик разломной зоны // Физика Земли. 2017. № 1. С. 87–96.
- 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., Кузьмичева М.Ю., Спивак А.А. Возмущение геомагнитного поля при землетрясениях // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 252–258.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Эффект влияния сильных землетрясений на геодинамо // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 1. С. 61–64. DOI:10.31857/S2686739722360008X, EDN: RXCQLY
- Белов С.В., Мигунов Н.И., Соболев Г.А. Магнитный эффект сильных землетрясений на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 1974. Т. 14. № 3. С. 380–382.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука. 2008. 295 с.

<sup>2</sup> Нельзя исключать возможность возмущения геодинамо в результате распространения вглубь Земли сейсмических волн от двух практически одновременно произошедших землетрясений при условии их сложения [Адушкин, Спивак, 2023].

<sup>3</sup> Для объяснения остаточного высоких значений амплитуд магнитных возмущений в приполярных областях (обсерватории JCO, SBA и VOS) требуются дополнительные исследования.



- Гульельми А.В., Рубан В.Ф. К теории индукционного сейсмомагнитного эффекта // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1990. № 5. С. 47–54.
- Гульельми А.В., Левшенко В.Т. Электромагнитные сигналы от землетрясений // Физика Земли. 1994. № 5. С. 65–70.
- Гульельми А.В. Инерционные эффекты в коре и в магнитосфере Земли // Физика Земли. 2008. № 1. С. 50–56.
- Гульельми А.В., Потапов А.С., Цэгмед Б. О возбуждении колебаний магнитного поля волной Лява // Физика Земли. 2002. № 3. С. 48–54.
- Губкин К.Е. О подобии взрывов // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. № 10. С. 49–60.
- 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 // Изв. высших учебных заведений. Физика. Т. 53. № 9/3. Томск: ТГУ. 2010. С. 268–269.
- Кролевец А.Н., Шереметьева О.В. Возможный механизм магнитных вариаций // Вулканология и сейсмология. 2004. № 4. С. 77–80.
- Куличков С.Н., Авиллов 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.
- Ларкина В.И., Мигулин В.В., Сергеева Н.Г., Сенин Б.В. Сравнительный анализ электромагнитных эффектов над зонами тектонических разломов // Докл. РАН. 2001. Т. 376. № 4. С. 532–538.
- Мигунов Н.И., Соболев Г.А. О сейсмомагнитных сигналах при землетрясениях Сахалина // Физика Земли. 2006. № 3. С. 81–84.
- 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.
- Рогожин Е.А. Землетрясение Тохоку 11.03.2011 ( $M = 9.0$ ) в Японии: тектоническая позиция очага, макросейсмические, сейсмологические и геодинамические проявления // Геотектоника. 2011. № 5. С. 3–16.
- 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.
- Садовский М.А., Адушкин В.В., Спивак А.А. О размере зон необратимого деформирования при взрыве в блочной среде // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1989. № 9. С. 9–15.
- Саломатин Л.В., Тихонов И.Н. Генерация сейсмомагнитных сигналов и возмущений при регистрации Невельского землетрясения 2007 года и его афтершоков (о. Сахалин) // Физика Земли. 2011. № 5. С. 78–87.
- Спивак А.А., Рябова С.А. Геомагнитные вариации при сильных землетрясениях // Физика Земли. 2019. № 6. С. 3–12.
- Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ. 2000. 448 с.
- Тихонов И.Н., Ломтев В.Л. Великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г.: тектонические и сейсмологические аспекты // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 2. С. 49–66.
- Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Т. 1. Л.: Гидрометеиздат. 1978. 247 с.
- 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.
- Borders C., Jouniaux L., Garambois S., Dietrich M., Pozzi J.-P., Gaffet S. Evidence of the theoretically predicted seismomagnetic conversion // Geophys. J. Int. 2008. V. 174. P. 489–504.
- 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. L20807. <https://doi.org/10.1029/2005GL024083>
- Fraser-Smith A.C. Ultralow-frequency magnetic fields preceding large earthquakes // EOS. 2008. V. 89. №23. P. 211.
- Hattori K. ULF Geomagnetic changes associated with large earthquakes // Terrestrial, Atmospheric and Ocean Sciences. 2004. V. 15. № 3. P. 329–360.
- Hayakawa M. On the fluctuation spectra of seismo-electromagnetic phenomena // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. V. 11. P. 301–308.
- Hayakawa M. Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes. Tokyo. TERRAPUB. 1999. 996 p.
- 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.
- Liu J.Y., Chen C.H., Chen Y.I., Yen H.Y., Hattori K., Yumoto K. Seismomagnetic anomalies and  $M > 5.0$  earthquakes observed in Taiwan during 1988–2001 // Physics and Chemistry of the Earth. 2006. V. 31. P. 215–222.
- Sgrigna V., Buzzi A., Conti L. et al. Electromagnetic signals produced by elastic waves in the Earth's crust // Nuovo Cimento. 2004. V. 27. № 2. P. 115
- 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. Geophysics. 2011. Article ID 848467. <https://doi.org/10.1155/2011/848467>
- 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.
- Xu G., Han P., Huang Q., Hattori K., Febriani F., Yamaguchi H. Anomalous behaviors of geomagnetic diurnal variations prior to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake ( $M_w = 9.0$ ) // J. Asian Earth Sciences. 2013. V. 77. P. 59–65.

## Magnetic Effects of the Double Earthquake of March 16, 2022 (Japan). Observation Results

V. V. Adushkin<sup>a</sup>, A. A. Spivak<sup>a, \*</sup>, D. N. Loktev<sup>a</sup>, Yu. S. Rybnov<sup>a</sup>, and A. V. Tikhonova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

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

**Abstract**—The magnetic effects of strong earthquakes are considered using the example of a unique event: two underwater earthquakes of magnitude 6.0 and 7.3 that occurred on March 16, 2022 at close times (at 14:34 and 14:36 UTC, respectively) with a distance between sources of ~11 km. With the use of data from the Mikhnevo geophysical observatory of the IDG RAS (MHV) and a number of magnetic observatories of the INTERMAGNET international network, it is shown that in the absence of global geomagnetic disturbances, earthquakes were accompanied by characteristic variations of the Earth's magnetic field recorded as a train of alternating geomagnetic field oscillations with an amplitude of ~2–8 nT and a period of ~30 min almost simultaneously at ~15:30 UTC by all magnetic observatories located at distances from 210 to ~13000 km, as well as by variations in the periods of passage of the seismic and infrasonic signal in the MHV.

*Keywords:* earthquake, atmospheric wave, ionosphere, magnetic field, variation