

УДК 550.385

ГЕОМАГНИТНЫЙ И ИОНОСФЕРНЫЙ ЭФФЕКТЫ ДВУХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В МАРОККО 08.09.2023 г.

© 2024 г. Академик В. В. Адушкин¹, А. А. Спивак^{1,*}, С. А. Рябова^{1,**}, А. В. Тихонова¹

Поступило 27.10.2023 г.

После доработки 28.11.2023 г.

Принято к публикации 01.12.2023 г.

Рассмотрены геофизические эффекты сильного сейсмического события в виде двух землетрясений магнитудой 6.8 и 4.9, произошедших 08.09.2023 г. в Марокко в близкие времена 22:11 и 22:30 UTC с эпицентральной дистанцией между очагами ~4 км. С использованием данных ряда обсерваторий сети INTERMAGNET и результатов магнитной регистрации в геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН показано, что в отсутствие значимых глобальных возмущений магнитного поля Земли землетрясения сопровождались серией из трех положительных бухтообразных геомагнитных вариаций с максимальными амплитудами от ~1 до ~10 нТл, следующих друг за другом через ~60 мин. Максимумы вызванных вариаций магнитного поля наблюдались практически синхронно на расстояниях от ~800 до ~10000 км. Время запаздывания магнитного эффекта относительно главного толчка первого землетрясения составило ~70 мин. С учетом практически планетарного характера и высокой синхронности вызванных возмущений магнитного поля в значительном диапазоне расстояний, а также задержек по времени, соответствующих по порядку величины времени пробега сейсмического сигнала расстояния, кратного размеру Земли, высказано предположение, что магнитный эффект рассматриваемого сейсмического события был вызван глобальным источником, в качестве которого может служить возбужденное геоинамо. Приведен ионосферный эффект рассматриваемого сейсмического события в виде вариаций критической частоты f_0F_2 , вычисленных по данным станции наземного зондирования обсерватории дель-Эбре.

Ключевые слова: землетрясение, инструментальные наблюдения, магнитное поле, вариация, критическая частота F2-слоя ионосферы

DOI: 10.31857/S2686739724030144

Наряду с хорошо известными вариациями магнитного поля, вызванными космическими факторами, наблюдаются магнитные вариации, связанные с процессами и явлениями природного и техногенного происхождения, протекающими как в верхних, так и в нижних геосферах [1–3]. Например, сильные землетрясения, которым сопутствует ряд геофизических эффектов, таких как деформация и разрушение горных пород, генерация сейсмических и атмосферных волн, вариации атмосферного электрического поля, изменение критической частоты F-слоя ионосферы и т.д., вызывают

также вариации магнитного поля, весьма чувствительного к внешним возмущениям [1, 4–6].

Изучение геомагнитных вариаций представляет значительный интерес не только с точки зрения всестороннего описания эффектов, сопутствующих землетрясениям, но и для понимания их внутренних механизмов, закономерностей их развития, а также влияния на среду обитания. При этом следует отметить, что вызванные магнитные вариации содержат важную информацию, которая необходима для разработки моделей, всесторонне описывающих магнитное поле Земли, а в целом — для установления природы и механизмов межгеосферных взаимодействий [4].

Несмотря на имеющиеся данные, имеется недостаток наблюдательного материала, основываясь на котором можно адекватно представлять сложную структуру магнитного эффекта

¹Институт динамики геосфер
им. Академика М.А. Садовского
Российской Академии наук, Москва, Россия
*E-mail: aaspivak100@gmail.com
**E-mail: riabovasa@mail.ru

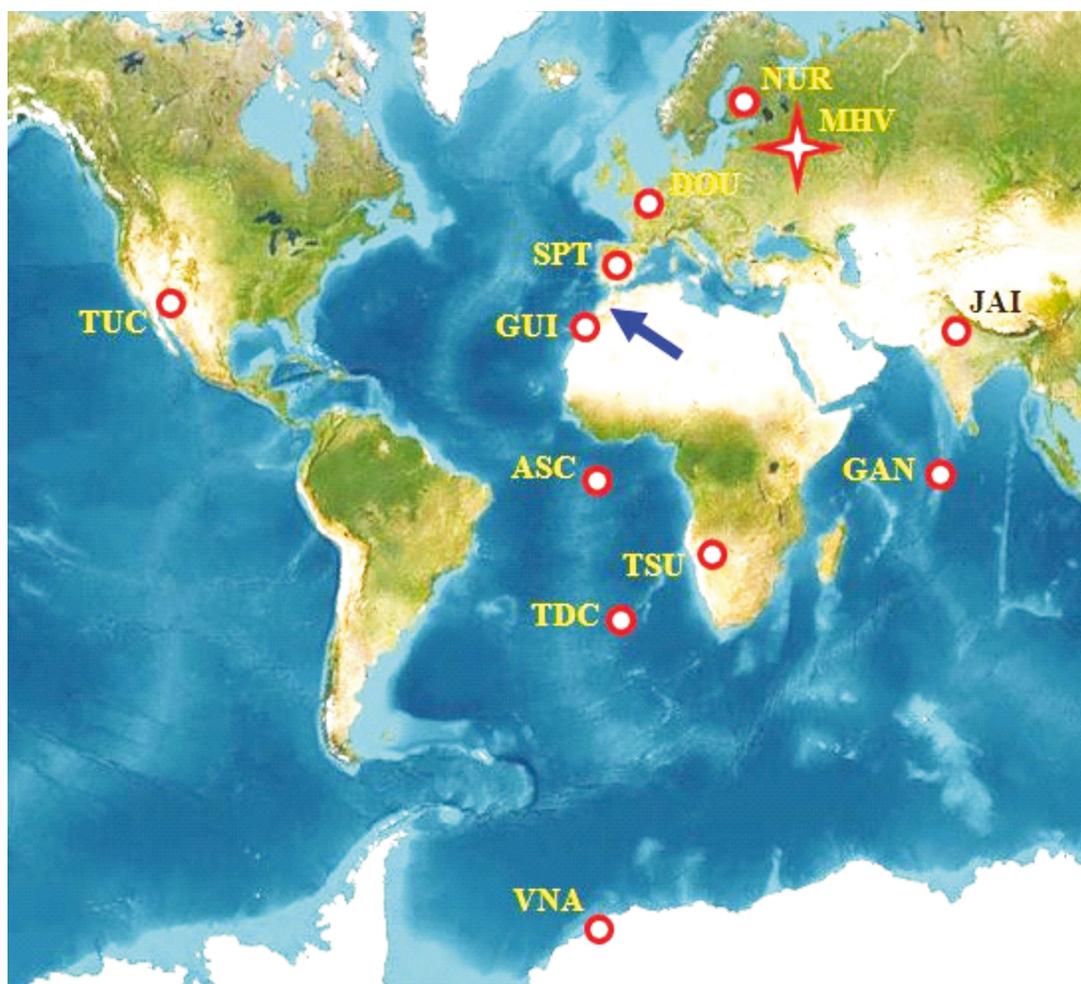


Рис. 1. Схема расположения очага землетрясения (синяя стрелка) и магнитных обсерваторий: кружки – обсерватории международной сети INTERMAGNET (коды обсерваторий приведены в поле рисунка), звездочка – обсерватория “Михнево” ИДГ РАН (MHV).

Таблица 1. Характеристика наиболее сильных землетрясений, произошедших в Марокко 08.09.2023 г., по данным из каталога USGS на 04.10.2023 г.

№ п/п	Дата	Время (UTC)	Магнитуда	Географические координаты		Глубина, км
				Широта	Долгота	
1	08.09.2023	22:11:01	6.8	31.055° N	8.389° W	19
2	- « -	22:30:44	4.9	31.036° N	8.352° W	10

землетрясений, что необходимо для разработки концептуальных, теоретических и феноменологических моделей, описывающих в полном объеме последствия сильных сейсмических явлений.

В настоящем сообщении рассматривается магнитный эффект двух сильных землетрясений, произошедших последовательно 08.09.2023 г. в Марокко через короткое время¹ (табл. 1) [7].

¹ По нашим оценкам сейсмическая энергия составила $\sim 10^{15}$ и $\sim 10^{12}$ Дж соответственно для первого и второго сейсмического события.

При этом основное внимание уделено наблюдаемым в большинстве случаев длиннопериодным вариациям магнитного поля, которые вносят основной вклад по энергии в магнитный эффект.

В качестве исходных данных использовались результаты инструментальных наблюдений, выполненных в ряде активно функционирующих в этот период времени обсерваториях сети INTERMAGNET (табл. 2, рис. 1) [8] и в Геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН (MHV, 54.96°N; 37.76°E) [1]. Анализировались вариации наиболее чувствительной к внешним

Таблица 2. Данные магнитных обсерваторий

Код	ГЕО		t_1 , UTC 08.09.2023	t_2 , UTC 09.09.2023	t_3 , UTC 09.09.2023	B_1 , нТл	B_2 , нТл	B_3 , нТл	R , км
	Широта	Долгота							
GUI	28.321° N	343.559° E	23:49	00:41	02:09	~1	~4	~2.5	~830
SPT	39.55° N	4.35° W	23:50	00:50	02:10	~2.5	~9	~4	~1010
DOU	50.1° N	4.6° E	23:50	00:41	02:09	~2.5	~10	~5	~2380
NUR	60.51° N	24.66° E	23:45	01:05	02:07	~3	~8	~10	~4070
ASC	7.95° S	14.38° W	23:49	00:40	02:10	~1	~2.5	~1	~4380
MHV*	54.96° N	37.76° E	23:42	01:05	02:10	~3	~8	~6.5	~4470
TSU	-19.202° N	17.584° E	23:50	00:42	02:10	~1	~6.5	~5	~6240
GAN	0.694° N	73.153° E	23:35	01:05	—	~1.5	~4	—	~7580
TDC	37.067° S	12.316° W	23:49	00:41	02:10	~1.5	~4	~3	~7870
JAI	26.92° N	75.8° E	23:35	01:05	02:15	~1	~1.5	~2.5	~7990
TUC	32.17° N	110.73° W	23:48	01:15	02:08	~4	~2	~1	~9240
VNA	70.683° S	8.283° W	23:50	00:51	01:55	~5	~5	~10	~11310

*Не входит в INTERMAGNET.

Таблица 3. Индексы магнитной активности K (по данным MHV) и Kp (по данным International Service of Geomagnetic Indices (ISGI)) за 08.09.2023 г.

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

возмущениям горизонтальной компоненты магнитной индукции B_x , ориентированной в направлении север–юг. Период рассматриваемого события характеризовался спокойной геомагнитной обстановкой (табл. 3), что упростило выделение вызванных возмущений магнитного поля.

Примеры геомагнитных вариаций, вызванных землетрясениями 08.09.2023 г. и зарегистрированных обсерваториями сети INTERMAGNET, расположенных на разных эпицентральных расстояниях R от очага события, приведены на рис. 2. Из данных рис. 2 следует, что рассматриваемые сейсмические события сопровождались хорошо выраженным магнитным эффектом, представленным в виде трех следующих друг за другом бухтообразных вариаций B_x длительностью от ~50 до ~80 мин и амплитудой от ~1 до ~10 нТл (характеристики каждого из бухтообразных возмущений в виде его максимальной амплитуды B_i и времени ее наступления t_i ($i = 1, 2, 3$) приведены в табл. 2). При этом сходный характер вызванных вариаций магнитного поля наблюдался практически одновременно на всех эпицентральных расстояниях R :

от 830 км до ~10000 км. Возмущения фиксируются, начиная с ~23:23 UTC 08.09.2023 г., то есть спустя примерно 70 мин после основного толчка события 1 из табл. 1. Первый максимум вызванных вариаций зарегистрирован спустя ~100 мин после первого события, второй и третий – соответственно через ~160 и ~220 мин. Общая длительность возмущенного периода магнитного поля оценивается в ~200 мин.

Синхронность наблюдаемых вариаций магнитного поля, сопутствующих рассматриваемому сейсмическому событию, в широком диапазоне эпицентральных расстояний и достаточно узкой с практической точки зрения интервал амплитуд свидетельствуют о высокой вероятности наличия единого глобального источника возмущений. С учетом задержек зарегистрированных магнитных возмущений относительно главного толчка на времена, соответствующие по порядку величины времени пробега сейсмического сигнала расстояния, кратного размеру Земли, можно предполагать, что в данном случае в качестве источника геомагнитных вариаций является геодинамо, возмущенное сейсмическими волнами,

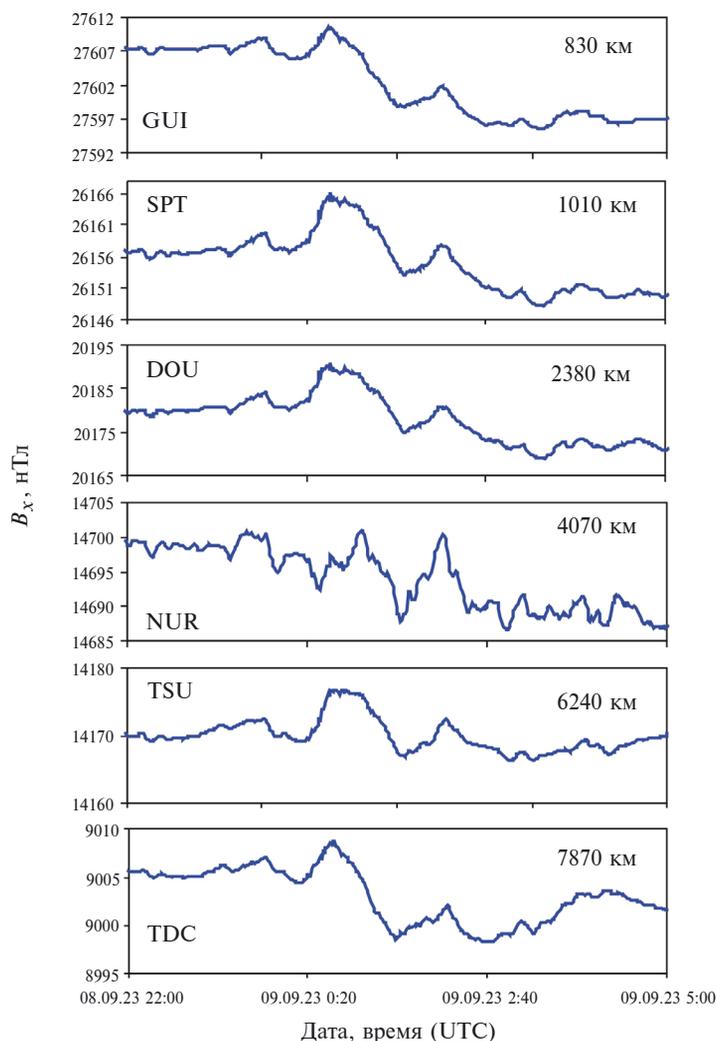


Рис. 2. Вариации горизонтальной компоненты индукции геомагнитного поля в период землетрясения 08.09.2023 г. в Марокко (коды обсерваторий и эпицентральные расстояния до очага землетрясения I из табл. 1 приведены в поле рисунка).

которые распространялись вглубь Земли. Вопрос о правомерности такого предположения уже поднимался авторами [9].

Действительно, было замечено, что двойные землетрясения сопровождаются в ряде случаев магнитным эффектом, сходным по характеру с эффектом, рассмотренным в настоящей работе [6, 10]. Учитывая мультидипольный характер магнитного динамо Земли [11], соотношение между энергией главного магнитного поля Земли ($\sim 10^{20}$ Дж) и энергиями сильных землетрясений, достигающих величин $\sim 10^{18} - 10^{22}$ Дж [7]), а также возможность триггерного эффекта воздействия, представляется весьма вероятным, что сейсмические волны, вызванные сильными, близкими по времени землетрясениями, распространяясь вглубь Земли, складываясь, оказывают влияние на турбулентные движения в области

жидкого ядра в эпицентральной области сейсмических очагов и, таким образом, возмущают расположенные здесь магнитные диполи, а в целом и суммарный магнитный диполь Земли. Это позволяет поставить вопрос о существовании класса землетрясений, которые в силу особенностей расположения очаговых зон и условий выделения сейсмической энергии способны оказывать влияние на магнитное динамо Земли и, как результат, на характеристики ее главного магнитного поля.

Отдельный интерес представляет рассмотрение ионосферного эффекта сильных землетрясений. В частности, в настоящей работе проведен анализ вариаций критической частоты F2-слоя ионосферы f_0F2 , характеризующих динамику состояния ионосферы в условиях внешних воздействий. С этой целью выполнялась обработка

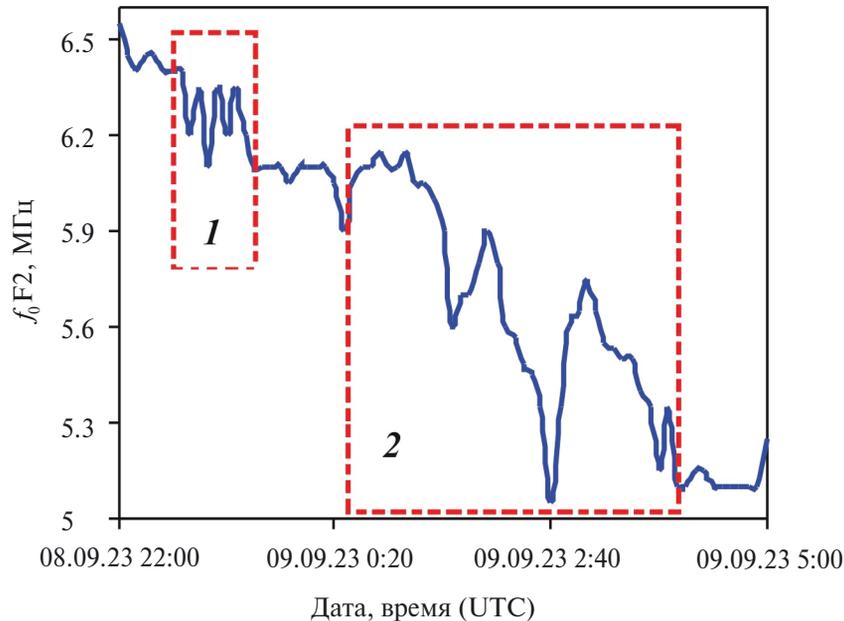


Рис. 3. Вариации критической частоты слоя F2 ионосферы по данным обсерватории дель-Эбре в период землетрясений 08.09.2023 г. (красной штриховкой обозначены первый (1) и второй (2) периоды возмущения f_0F2).

исходных данных в виде ионограмм высотного зондирования, полученных в обсерватории дель-Эбре (координаты ионосферной станции: 40.8° с.ш.; 0.49° в.д.). Ионограммы размещены в доступном виде на сайте обсерватории дель-Эбре [12]. В процессе обработки данных каждая ионограмма подвергалась ручной обработке и интерпретации по методике URSI [13]. В результате формировался цифровой ряд данных временной вариации критической частоты f_0F2 с дискретизацией 5 мин.

На рис. 3 представлены вариации f_0F2 в период землетрясений в Марокко 08.09.2023 г. Из рис. 3 следует, что рассматриваемое событие вызвало ярко выраженные продолжительные знакопеременные вариации критической частоты f_0F2 с периодом около 10 мин с $\sim 22:40$ до $\sim 23:15$ UTC 08.09.2023 г. (максимальная амплитуда вариаций ~ 0.35 МГц) и с $\sim 00:00$ до $\sim 03:10$ UTC 09.09.2023 г. с периодом ~ 35 – 50 мин (максимальная амплитуда вариаций ~ 0.9 МГц). Общая продолжительность вариаций критической частоты F2-слоя составила ~ 4 – 5 ч. Первое возмущение f_0F2 с периодом ~ 10 мин связано с влиянием на ионосферу Релеевских волн от землетрясений [14]. Второе возмущение f_0F2 в виде более длиннопериодного сигнала связано, вероятнее всего, с распространением внутренних гравитационных волн [15].

Приведенные в настоящем сообщении данные, по мнению авторов, дополняют существующие в настоящее время представления о геофизических последствиях сильных землетрясений и могут оказаться полезными при разработке и верификации аналитических и численных моделей, всесторонне описывающих энергообменные процессы при сейсмических событиях, а также их влияние на внешние геосферы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов. М.: ГЕОС, 2021. 264 с.
2. Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю., Соловьев А.А. Геомагнетизм: от ядра Земли до Солнца. М.: РАН, 2019. 186 с.
3. Адушкин В.В., Спивак А.А. Воздействие экстремальных природных событий на геофизические поля в среде обитания // Физика Земли. 2021. № 5. С. 6–16.

4. Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 2014. 360 с.
5. Спивак А.А., Рябова С.А. Геомагнитные вариации при сильных землетрясениях // Физика Земли. 2019. № 6. С. 3–12.
6. Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А., Спивак А.А., Тихонова А.В. Геофизические эффекты серии сильных землетрясений в Турции 06.02.2023 г. // Физика Земли. 2023. № 6. С. 142–152.
7. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
8. https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2
9. Адушкин В.В., Спивак А.А. Эффект влияния сильных землетрясений на геодинамо // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 1. С. 61–64.
10. Адушкин В.В., Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Тихонова А.В. Магнитный эффект двойного землетрясения 16.03.2022 г. (Япония). Результаты наблюдений // Физика Земли. 2023. № 5. С. 142–152.
11. Демина И.М., Никитина Л.В., Л.В., Фарафонова Ю.Г. Вековые вариации главного магнитного поля Земли в рамках динамической модели его источников // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 4. С. 567–575.
12. <https://www.obsebre.es/en/>
13. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Под редакцией П.В. Медниковой. М.: Наука. 1977. 342 с.
14. Maruyama T., Tsugawa T., Kato H., Ishii M., Nishioka M. Rayleigh wave signature in ionograms induced by strong earthquakes // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2012. V. 117. A08306, DOI: 10.1029/2012JA017952.
15. 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.

GEOMAGNETIC AND IONOSPHERIC EFFECTS TWO CONSECUTIVE STRONG EARTHQUAKES IN MOROCCO ON SEPTEMBER 08, 2023

Academician of the RAS V. V. Adushkin^a, A. A. Spivak^{a,#}, S. A. Riabova^{a,##}, A. V. Tikhonova^a

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

[#]*E-mail: aaspivak100@gmail.com*

^{##}*E-mail: riabovasa@mail.ru*

The geophysical effects of a strong seismic event in the form of two earthquakes of magnitude 6.8 and 4.9 that occurred on September 08, 2023 in Morocco at close times 22:11 and 22:30 UTC with an epicentral distance between the foci of ~ 4 km are considered. We used data from a number of observatories of the INTERMAGNET network and the results of magnetic registration at the Mikhnevo Geophysical Observatory of IDG RAS. It was shown that in the absence of significant global disturbances of the Earth's magnetic field, earthquakes were accompanied by a series of three positive bay-shaped geomagnetic variations with maximum amplitudes from ~ 1 to ~ 10 nT, following each other after ~ 60 min. The maxima of the induced magnetic field variations were observed almost synchronously at distances from ~ 800 to ~ 10000 km. The delay time of the magnetic effect relative to the main shock of the first earthquake was ~ 70 min. Taking into account the almost planetary nature and high synchronicity of the magnetic field disturbances caused over a significant range of distances, as well as time delays corresponding in order of magnitude to the travel time of the seismic signal of a distance multiple of the size of the Earth, it is suggested that the magnetic effect of the seismic event in question was caused by a global source, which can serve as an excited geodynamo. The ionospheric effect of the seismic event under consideration is presented in the form of variations of the critical frequency f_0F_2 calculated from the data of the ground-based sounding station of the del Ebre Observatory.

Keywords: earthquake, instrumental observations, magnetic field, variation, critical frequency of the F2 layer of the ionosphere