

ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ ПРИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

© 2019 г. А. А. Спивак*, С. А. Рябова

Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия

**E-mail: spivak@idg.chph.ras.ru*

Поступила в редакцию 09.04.2019 г.

Принята в печать 24.06.2019 г.

С привлечением данных Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН и ряда обсерваторий международной сети INTERMAGNET анализируется геомагнитный эффект, вызванный сильными землетрясениями. Показано, что сейсмические события сопровождаются характерными вариациями магнитного поля Земли. При этом отчетливо выделяются короткопериодная составляющая вызванных геомагнитных вариаций (период ~ 0.5 – 0.8 мин), регистрируемая при неглубоких землетрясениях, и длиннопериодная (период ~ 5 – 20 мин), которая наблюдается в большинстве случаев. Максимальная амплитуда наведенных геомагнитных вариаций составляет ~ 1.5 – 5 нТл и ~ 2 – 20 нТл, соответственно, для короткопериодных и длиннопериодных вариаций. Отмечен практически одновременный и сходный по морфологии характер вызванных геомагнитных возмущений, зарегистрированных в обсерваториях, расположенных на значительно отличающихся расстояниях от очага землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение, геомагнитное поле, вариации.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-3337201963-12>

1. ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения, особенно сильные, представляют собой яркий пример проявления природных сил. Значительные механические эффекты в очаговой области землетрясения в виде подвижек и деформации горных пород, изменения их свойств и напряженно-деформированного состояния, изменения химического состава и температуры подземных вод, электрофизических свойств среды, а также другие сопутствующие землетрясению явления и процессы, включая усиление эманаций природного радона и возбуждение сейсмических сигналов, — все это оказывает влияние на режимы геофизических полей [Долгих и др., 2007; Руленко, 2000; Соболев, 1993; Nattori, 2004]. Не является исключением и геомагнитное поле. Неоднократно отмечалось, что на последней стадии подготовки землетрясения, в период основного толчка, а также в период афтершоковой активности регистрируются возмущения магнитного поля на земной поверхности [Гульельми, Зотов, 2012; Зотов и др., 2013; Липеровский и др., 2008; Романова и др., 2015; Собисевич и др., 2013; 2017; Сурков, 2000; Черногор, 2019; Fraser-Smith, 2008; Nattori, 2004; Utada et al., 2011]. Характерно, что при этом

одновременно отмечаются вариации полного электронного содержания в слое $F2$ ионосферы с периодами от 5–10 до 20–50 мин на расстояниях до 7 тыс. км, что объясняется возмущением ионосферы деформационно-барическими процессами, сопровождающими сейсмическое событие [Дубров, Смирнов, 2013].

Предложенные механизмы возбуждения геомагнитных вариаций в период землетрясения до настоящего времени остаются дискуссионными. Наряду с литосферными источниками возмущений [Соболев, Пономарев, 2003; Fenoglio et al., 1995] в качестве наиболее вероятного рассматривается механизм, связанный с воздействием вызванных землетрясением акустических колебаний на ионосферу в эпицентральной области события, что приводит к генерации МГД-волны, которая со значительной скоростью распространяется по ионосфере [Бондур, Смирнов, 2005; Голиков и др., 1985; Колесник, Пикалов, 2010; Филиппов и др., 2007; Черногор, 2019; Шалимов, 2018; Iyemori et al., 2005]. При этом следует отметить, что, несмотря на значительное количество исследований, посвященных влиянию землетрясений на магнитное поле Земли, ощущается определенный дефицит наблюдательного материала, необходимого для верификации

предложенных моделей и механизмов влияния землетрясения на магнитное поле Земли.

В настоящей работе представлены предварительные результаты инструментальных наблюдений за геомагнитным эффектом, сопровождающим сильные землетрясения.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных использовались результаты инструментальных наблюдений, выполненных в Геофизической обсерватории «Михнево» (МНВ) ИДГ РАН и в некоторых среднеширотных обсерваториях сети INTERMAGNET (табл. 1). 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.

Рассматривались вариации магнитного поля в период землетрясений, произошедших в разных регионах с магнитудой, превышающей 5 (табл. 2). При этом анализировались события, которые произошли в период, характеризующийся отсутствием значимых проявлений магнитной активности (в табл. 3 приведены значения K_p -индекса магнитной активности и K -индекса магнитной активности по данным обсерватории МНВ за дни, в которые произошли события, рассмотренные в настоящей статье). Это позволяло выделять наведенные землетрясением геомагнитные вариации на фоне солнечной составляющей.

3. ГЕОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В качестве примера на рис. 1 приведена запись компонент B_x , B_y и B_z магнитного поля Земли¹, полученная в ГФО МНВ в период землетрясения 29.08.2018 г. (Новая Каледония). Землетрясение магнитудой $M=7.1$ произошло в 03:51 UT на глубине ~ 26 км. Приведенные на рис. 1 данные свидетельствуют о ярко выраженных вариациях магнитного поля в период землетрясения. При этом отчетливо выделяется цуг короткопериодных повышенных геомагнитных вариаций с периодом ~ 50 с, начало которого зафиксировано в $\sim 03:53$ UT, фактически сразу после основного толчка (время запаздывания относительно основного толчка составляет ~ 2 мин). Максимальная амплитуда вариаций на этой стадии составила ~ 4 нТл, ее длительность ~ 3 мин. Как это видно из рис. 1, короткопериодные вариации в большей степени проявились на горизонтальных компонентах магнитного поля.

Вслед за короткопериодными наблюдаются длиннопериодные вариации с максимальной амплитудой ~ 5.5 нТл длительностью около 7 мин. Начало этой стадии вариаций с периодом ~ 5 мин фиксируется в $\sim 03:59$ UT. На этой стадии, также как и на короткопериодной, амплитуда вариаций горизонтальной компоненты примерно вдвое превышает амплитуду вариаций вертикальной компоненты магнитного поля. При этом короткопериодные возмущения, которые наблюдаются, как

¹ Направление осей координат: x – С–Ю, y – В–З, z – вертикально вниз.

Таблица 1. Пункты геомагнитных наблюдений

Наименование	Обозначение	Широта, град	Долгота, град
Арти (РФ)	ARS	56.43	58.56
Бельск (Польша)	BEL	51.84	20.79
Борок (РФ)	BOX	58.07	38.23
Иркутск (РФ)	IRT	52.27	104.45
Киев (Украина)	KIV	50.72	30.3
Львов (Украина)	LVV	49.9	23.75
Михнево (РФ)	MNV	54.94	37.73
Новосибирск (РФ)	NVS	54.85	83.23
С.-Петербург (РФ)	SPG	60.54	29.72
Хабаровск (РФ)	KHB	47.61	134.69

Таблица 2. Перечень рассмотренных землетрясений

№ п/п	Дата	Примерное время основного толчка, UT	Магнитуда	Район
1	01.03.2019	08:50	7.2	Перу
2	25.09.2018	06:17	5.0	Мексика
3	16.09.2018	11:48	6.5	О-ва Фиджи
4	12.09.2018	04:50	5.3	Индия
5	07.09.2018	02:10	6.2	Эквадор
6	06.09.2018	15:49	7.9	О-ва Фиджи
7	29.08.2018	03:52	7.1	Новая Каледония
8	28.08.2018	22:35	6.4	Марианские о-ва
9	19.08.2018	14:56	6.9	Индонезия
10	15.08.2018	21:56	6.5	Аляска
11	12.08.2018	14:58	6.3	Аляска
12	07.07.2018	21:33	6.0	Нов. Зеландия
13	09.05.2018	10:41	6.2	Таджикистан
14	18.05.2018	01:41	6.1	О-ва Кермадек
15	02.05.2018	06:32	6.0	Исландия
16	15.04.2018	19:30	6.0	Индонезия
17	05.04.2018	03:53	6.0	Филиппины
18	29.03.2018	21:25	6.9	Нов. Гвинея
19	28.02.2018	02:45	6.1	Нов. Гвинея
20	27.02.2018	17:29	6.1	О-в Маккуори
21	26.02.2018	13:34	6.1	Индонезия
22	11.02.2018	23:14	6.0	Марианские о-ва
23	06.02.2018	15:50	6.4	Тайвань
24	28.01.2018	16:03	6.2	Афганистан
25	24.01.2018	10:50	6.3	Япония
26	10.01.2018	02:51	7.5	Гондурас
27	23.11.2016	11:37	5.0	Прибайкалье
28	11.09.2016	08:07	~5.0	Приамурье
29	14.08.2016	11:15	6.3	Сахалин
30	07.08.2016	08:15	5.0	Сев. Кавказ
31	13.05.2016	17:47	5.2	Сев. Кавказ
32	14.04.2016	03:06	6.2	Камчатка
33	03.02.2016	18:27	~5.0	Прибайкалье
34	02.01.2016	04:22	6.1	Приамурье
35	24.05.2014	09:30	6.9	Эгейское море
36	01.04.2014	23:46	7.8	Чили

правило, при мелкофокусных событиях с глубиной менее ~30 км, регистрируются после основного толчка с небольшой задержкой. Как пример на рис. 2 представлены результаты регистрации магнитного поля, выполненные в обсерватории МНУ в период землетрясения 24.05.2014 г. Землетрясение с магнитудой по разным данным

от 6.4 до 6.9 произошло в Эгейском море, время в очаге ~09:30 UT, глубина 10–29 км. Из данных рис. 2 следует, что начало длиннопериодных геомагнитных возмущений с периодом ~5 мин фиксируется в ~09:30 UT. Максимальная амплитуда вариаций B_H на этой стадии составляет ~2 нТл, длительность ~10–12 мин.

Таблица 3. Значения K_p - и K -индексов магнитной активности по датам

Параметр	Время суток (UT)							
	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
24.05.2014 г.								
K_p	2	1	2	0*	1	1	1	1
K	1	2	2	1*	2	2	1	1
10.01.2018 г.								
K_p	1*	2	1	1	0	1	0	0
K	1*	0	0	1	1	1	1	0
24.01.2018 г.								
K_p	0	0	0	1*	3	3	1	4
K	0	0	0	1*	3	3	1	4
29.03.2018 г.								
K_p	0	0	1	2	1	2	1	1*
K	0	0	1	2	1	1	1	1*
15.04.2018 г.								
K_p	2	1	1	1	2	1	1*	2
K	2	1	1	1	2	1	1*	2
09.05.2018 г.								
K_p	3	3	2	2*	2	2	4	4
K	3	2	2	2*	3	3	3	3
07.08.2018 г.								
K_p	4	1	2*	2	3	3	1	2
K	4	1	2*	2	3	3	1	2
29.08.2018 г.								
K_p	2	2*	1	1	1	2	1	1
K	2	1*	1	1	1	2	1	1
07.09.2018 г.								
K_p	2*	2	1	1	1	1	0	1
K	1*	2	2	1	1	2	1	1

* Значение параметров в период времени, соответствующий времени основного толчка при землетрясении.

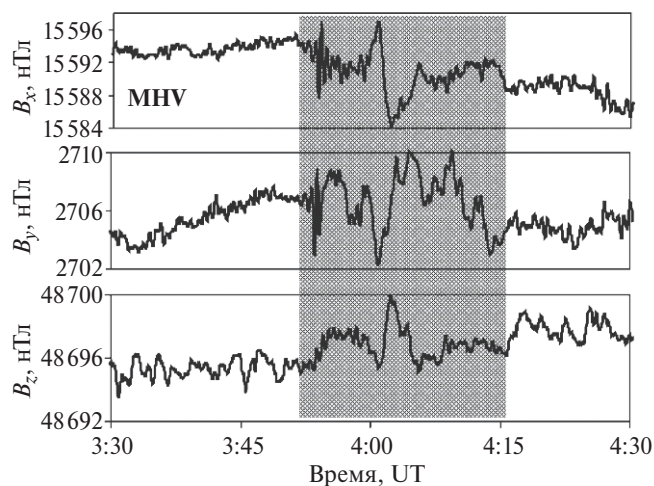


Рис. 1. Вариации геомагнитной индукции в период землетрясения 29.08.2018 г. в Новой Каледонии (регистрация в МНВ). Здесь и на следующих рисунках фоном выделены наведенные вариации магнитного поля.

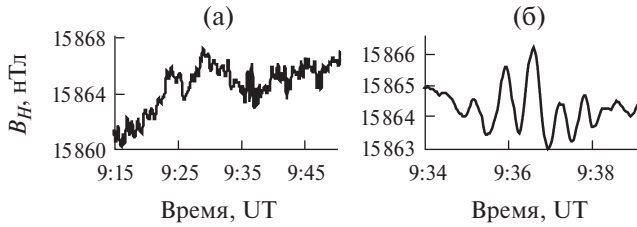


Рис. 2. Длиннопериодные (а) и короткопериодные (б) вариации горизонтальной компоненты геомагнитной индукции в период землетрясения 24.05.2014 г. в Эгейском море (регистрация в MHV).

Начало короткопериодных возмущений (период ~ 0.6 мин) регистрируется в 09:35 UT (спустя ~ 5 мин после основного толчка). При этом выделяется основное возмущение длительностью ~ 3 мин и амплитудой ~ 1.5 нТл, после которого в течение некоторого времени наблюдаются повышенные вариации B_H .

Значительный интерес представляет рассмотрение геомагнитных возмущений в обсерваториях, расположенных на разных расстояниях от очага землетрясения. В качестве примера на рис. 3а–3г приведены записи горизонтальной, наиболее возмущенной компоненты B_x , полученные в MHV и в некоторых обсерваториях сети INTERMAGNET в периоды землетрясений 2018 г. из списка табл. 2. Из данных рис. 3 следует, что при глубине очага более 30 км наблюдаются только длиннопериодные геомагнитные возмущения (период от ~ 15 до ~ 30 мин), которые имеют сходную морфологию и возникают практически одновременно на записях обсерваторий, отстоящих друг от друга на значительном расстоянии.

Особенность данных, представленных на рис. 3а–3г, состоит в том, что начало вызванных землетрясениями длиннопериодных геомагнитных возмущений регистрируется спустя небольшое время после основного толчка.

Помимо рассмотренных выше случаев, вызванные землетрясениями, подобные по форме, длиннопериодные возмущения магнитного поля зарегистрированы при большинстве событий, перечисленных в табл. 2: 02.01.2016 г., 03.02.2016 г., 14.04.2016 г., 13.05.2016 г., 14.08.2016 г., 11.09.2016 г., 24.01.2018 г., 18.03.2018 г., 29.03.2018 г., 02.05.2018 г., 18.05.2018 г., 07.07.2018 г., 12.08.2018 г., 15.08.2018 г., 19.08.2018 г., 28.08.2018 г., 12.09.2018 г., 16.09.2018 г., 25.09.2018 г. и 01.03.2019 г.

При ряде землетрясений вызванные землетрясением геомагнитные возмущения имеют вид бухтообразного уменьшения индукции магнитного поля, что согласно имеющимся в литературе

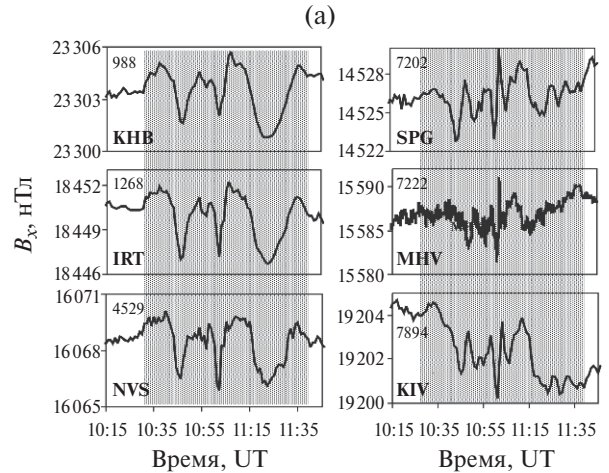


Рис. 3а. Вариации компоненты B_x геомагнитной индукции, зарегистрированных в MHV и обсерваториях INTERMAGNET, в период землетрясения 24.01.2018 г. (Япония, $M=6.3$; глубина более 30 км). Здесь и на следующих рисунках цифра в поле рисунка обозначает расстояние до очага сейсмического события.

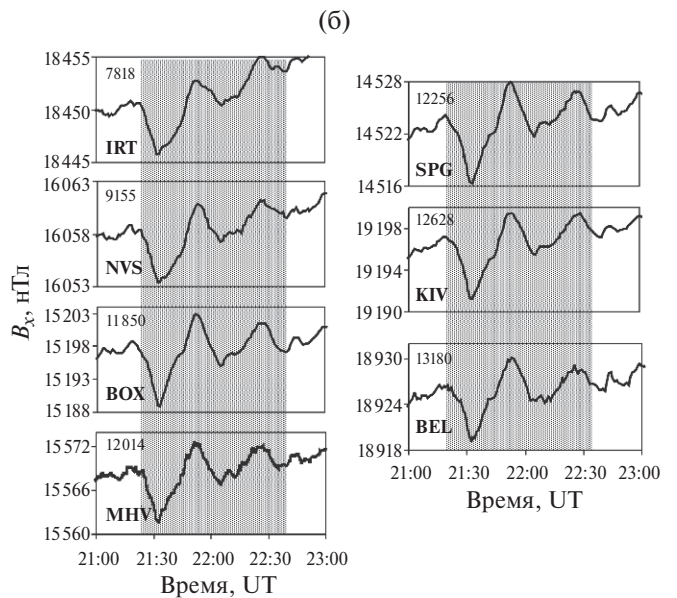


Рис. 3б. Вариации компоненты B_x в период события 29.03.2018 г. (Новая Гвинея, $M=6.9$; глубина ~ 35 км).

данным [Hattori, 2004; Takla et al., 2011] характерно, скорее, для предвестника сейсмического события, который наблюдается за несколько часов и даже суток до основного толчка. В нашем случае бухтообразное понижение индукции магнитного поля регистрируется в период самого события, либо спустя несколько минут после основного толчка. Характерные примеры такой реакции магнитного поля на землетрясение

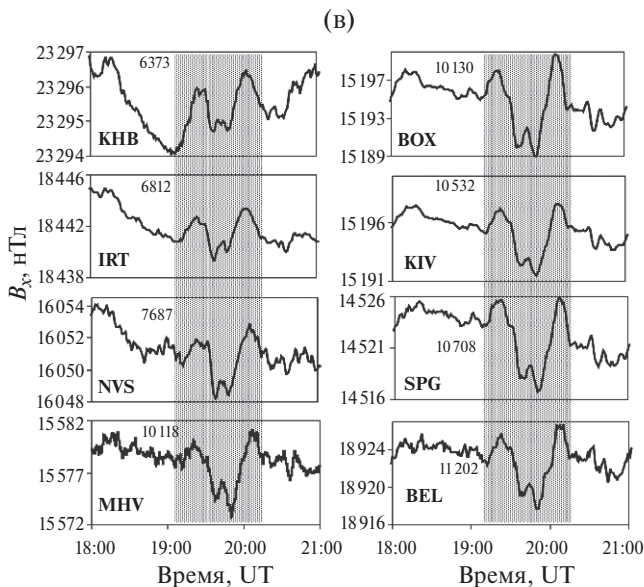


Рис. 3в. Вариации компоненты B_x в период события 15.04.2018 г. (Индонезия, $M=6.0$; глубина 34 км).

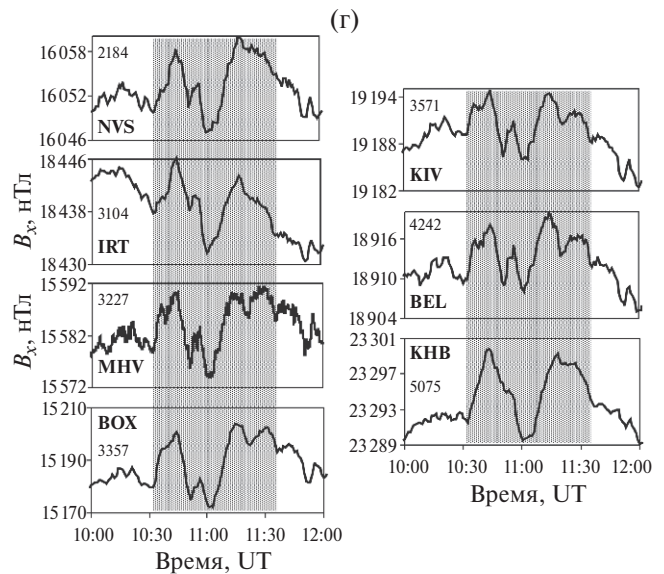


Рис. 3г. Вариации компоненты B_x в период события 09.05.2018 г. (Таджикистан, $M=6.2$; глубина более 100 км).

приведены на рис. 4. На рис. 4а представлены геомагнитные вариации, зарегистрированные в период землетрясения с магнитудой ~ 5.0 , произошедшего 07.08.2016 г. на Северном Кавказе. На рис. 4б – вариации магнитного поля в период землетрясения с магнитудой 7.5, произошедшего 10.01.2018 г. в Гондурасе. Подобная реакция магнитного поля на землетрясение в виде бухтообразного понижения магнитной индукции

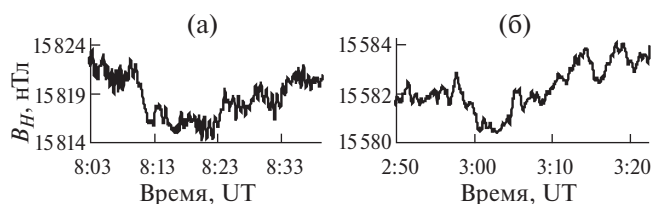


Рис. 4. Вариации горизонтальной компоненты магнитного поля, зарегистрированные в МНВ, в периоды землетрясений 07.08.2016 г. на Северном Кавказе (а) и 10.01.2018 г. в Гондурасе (б).

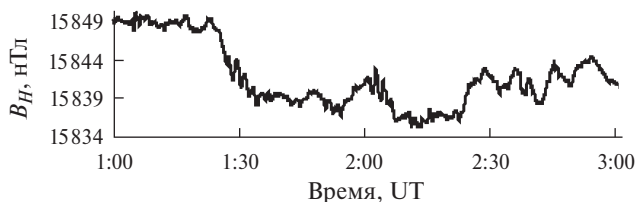


Рис. 5. Вариации горизонтальной компоненты магнитного поля, зарегистрированные в МНВ, в период землетрясения 07.09.2018 г. в Эквадоре.

магнитного поля отмечается также и в ряде других случаев: события 06.02.2018 г., 11.02.2018 г., 26.02.2018 г., 27.02.2018 г., 28.02.2018 г., 05.04.2018 г., 15.04.2018 г., 09.05.2018 г., 06.09.2018 г. и 01.03.2019 г. из рассмотренных в настоящей работе.

В отдельных случаях (события 10.04.2018 г. и 07.09.2018 г. из табл. 2) реакция магнитного поля на землетрясения проявляется в виде комбинации общего уменьшения индукции магнитного поля с наложением его хорошо выраженных длиннопериодных вариаций. На рис. 5 в качестве примера представлены вариации магнитного поля в период землетрясения с магнитудой 6.2, произошедшего 07.09.2018 г. в Эквадоре. Из рис. 5 следует, что на фоне основного бухтообразного уменьшения магнитного поля выделяются участки его повышения с элементами периодичности. И, наконец, на последней стадии, начиная с $\sim 02:30$ UT регистрируются длиннопериодные вариации магнитного поля с периодом ~ 6.4 мин.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей работе сделана попытка выделить влияние землетрясений на магнитное поле Земли на основе рассмотрения геомагнитных вариаций в периоды сильных сейсмических событий, происходящих в условиях низкой магнитной активности, когда составляющая

возмущений солнечного происхождения — основного фактора, определяющего изменчивость магнитного поля, достаточно мала. Приведенные данные свидетельствуют о сложном характере отклика магнитного поля на землетрясения. По всей видимости, конкретный вид вызванных геомагнитных возмущений определяется многими факторами, такими как магнитуда сейсмического события, параметры очага, его механизм и глубина, геология района, свойства горных пород и массива. Установление влияния каждого из факторов на морфологию и амплитуду геомагнитного эффекта требует проведения детальных исследований, результаты которых при соответствующей статистической обоснованности могут лечь в основу модели геомагнитного отклика на сейсмическое событие.

Вопрос о механизмах воздействия сейсмического события на магнитное поле в настоящее время нельзя считать окончательно решенным. Установление их природы также требует проведения дополнительных исследований. Тем не менее, следует отметить, что, согласно современным представлениям, выделяют ряд основных физических механизмов возбуждения геомагнитных вариаций при землетрясениях. Наиболее значимым по амплитуде вызываемых геомагнитных вариаций следует рассматривать электрокинетический эффект, связанный с разделением и релаксацией электрических зарядов в результате перколяции минерализованных вод через микрокапилляры горных пород, структура которых может к тому же изменяться в процессе микроразрушения пород на последней стадии подготовки очага сейсмического события, а также в результате течения флюида в раскрывающихся трещинах в процессе самого землетрясения [Fenoglio et al., 1995; Fitterman, 1979; Ishido, Mizutani, 1981; Mizutani et al., 1976].

Другим возможным механизмом генерации вызванных геомагнитных возмущений являются процессы, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния среды и слагающих ее горных пород, обладающих пьезомагнитными либо ферромагнитными свойствами, в процессе формирования очага и реализации землетрясения [Takla et al., 2011; Sasai, 1991]. В последнем случае, находясь в магнитном поле Земли, такие горные породы как габбро, гранодиорит, некоторые типы гранитов, при медленных движениях на стадии формирования очага и сильных движениях вдоль магистрального разрыва в момент основного толчка являются источником магнитных вариаций [Кролевец, Шереметьева, 2004; Соболев, Пономарев, 2003].

В любом случае изменение магнитной восприимчивости и электрической проводимости горных пород в процессе резкого сброса напряжений способно вызвать геомагнитный эффект [Liu et al., 2006; Merzer, Klempere, 1997].

Длиннопериодные вариации, по всей видимости, связаны с возмущениями геофизической среды (атмосферы, ионосферы), возникающими на крайней стадии подготовки очага землетрясения и в процессе сейсмического события [Гохберг, Шалимов, 2008; Соболев, Пономарев, 2003]. Известны процессы, непосредственно предвещающие землетрясения и способные привести к накоплению эффектов разной природы, и, как результат, — лавинообразному возмущению магнитного поля [Собисевич и др., 2017; Xu et al., 2013]. В таком качестве могут выступать любые механоэлектрические и электрофизические процессы. Действительно, перед сильными землетрясениями наблюдаются движения, деформация и растрескивание горных пород, изменение их напряженного состояния, изменение интенсивности эманаций подземных газов и уровня подземных вод, повышение интенсивности электролиза в подземных флюидах с выделением газообразных продуктов и т. д., что приводит к разделению электрических зарядов в твердой среде, изменению токовых систем и в результате — к возмущению ионосферы [Липеровский и др., 2008].

Представляет также интерес рассмотрение в качестве источника геомагнитных вариаций возмущение ионосферы в результате действия на нее акустико-гравитационных волн, формирующихся у земной поверхности в момент главного толчка.

Генерация геомагнитных вариаций при землетрясениях за счет сейсмических волн, т. е. сейсмомагнитный эффект, при котором скорости распространения сигнала составляют первые тысячи километров в секунду, либо перемещение ионосферных возмущений (скорости от 150 до 3000 м/с) [Перевалова и др., 2016] не объясняют достаточно высокую одновременность наведенных геомагнитных вариаций в пунктах, расположенных на разных, в ряде случаев значительных, расстояниях друг от друга, как это показано выше. Вероятнее всего в нашем случае возмущение магнитного поля вызвано литосферными источниками [Зотов и др., 2013], либо возмущениями в ионосфере Земли в эпицентральной зоне очага землетрясения, которые привели к дестабилизации глобальных токовых систем. В качестве механизма воздействия

землетрясения на ионосферу можно рассматривать, например, изменение концентрации электронов под действием, как уже упоминалось, акустико-гравитационных волн, генерируемых у земной поверхности в период активности геодинамических процессов непосредственно перед, во время и сразу после землетрясения [Липеровский и др., 2008; Гармаш и др., 1989; Chum et al., 2012; Tsugawa et al., 2011]. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что аномальные вариации электронной концентрации в ионосфере с периодом от 5–10 мин до 20–40 мин могут регистрироваться за 1–2 ч до землетрясения [Дубров, Смирнов, 2013].

Анализ результатов инструментальных наблюдений свидетельствует о хорошо выраженном геомагнитном эффекте сильных землетрясений. При этом следует обратить внимание на существование двух составляющих в вызванных геомагнитных возмущениях: короткопериодных (период менее 1 мин) и длиннопериодных (период ~ 5 мин) вариаций. Короткопериодные аномальные вариации магнитного поля наблюдаются спустя некоторое непродолжительное время после основного толчка, что может свидетельствовать о том, что их источником являются быстрые процессы, протекающие в узко локализованной зоне магистрального разрыва в момент события.

В качестве источника длиннопериодных геомагнитных вариаций здесь, по всей видимости, следует рассматривать литосферные процессы, сопутствующие землетрясению. Обращает на себя внимание сходство и совсем небольшое отличие во временах возникновения вызванных длиннопериодных сигналов в разных пунктах магнитных наблюдений при конкретном землетрясении, что хорошо видно из данных рис. 3. При этом следует также отметить, что и амплитуда ΔB вызванных длиннопериодных геомагнитных возмущений, зарегистрированных в разных обсерваториях, при отдельно взятом землетрясении примерно одинакова. Например, для события 24.01.2018 г. ΔB находится в интервале ~ 1.8 (KIV) – 3.0 (IRT) нТл, для события 29.03.2018 г. – в интервале ~ 15 (BOX) – 18 (BEL) нТл и т. д.

Другая особенность связана с наличием отличий в морфологических характеристиках вызванных длиннопериодных вариаций магнитного поля при разных сейсмических событиях, что можно объяснить как различиями в параметрах очагов землетрясений, так и отличительными свойствами среды.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящей работе данные дополняют имеющиеся представления о геомагнитных вариациях, сопутствующих сильным землетрясениям, и могут быть полезны при разработке и верификации моделей подготовки и развития указанных событий, а также сопровождающих их геофизических процессов. Наряду с этим следует также отметить, что характеристики регистрируемых при землетрясении вариаций геофизических полей с большой вероятностью содержат информацию о физико-механических свойствах среды, в которой формируется его очаг, а также о его характеристиках.

Представленные результаты свидетельствуют о необходимости проведения целенаправленных исследований, связанных с установлением роли каждого из возможных источников возмущений магнитного поля Земли при землетрясениях. Для этого требуется разделить их влияния и сопоставить характеристики вызванных геомагнитных вариаций с параметрами очага землетрясения, геологией района, свойствами среды и т. д.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены по Программе фундаментальных исследований президиума РАН № 19 «Фундаментальные проблемы геолого-геофизического изучения литосферных процессов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Смирнов В.М.* Метод мониторинга сеймоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Докл. РАН. 2005. Т. 402. С. 675–679.
- 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. Т. 25. № 12. С. 1290–1299.
- Голиков Ю.В., Д'Коста А., Пилипенко В.А.* Геомагнитные пульсации, возбуждаемые при сильных землетрясениях // Геомагнетизм и аэрномия. Т. XXV. 1985. С. 824–828.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л.* Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука. 2008. 295 с.
- Гульельми А.В., Зотов О.Д.* О магнитных возмущениях перед сильными землетрясениями // Физика Земли. 2012. № 2. С. 84–87.
- Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Овчаренко В.В., Маратулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Широков О.Н., Чушин В.А., Яковенко С.В.* Деформационные и акустические предвестники землетрясений // Докл. РАН. 2007. Т. 413. № 1. С. 96–100.

- Дубров М.Н., Смирнов В.М.* Взаимосвязанные возмущения земной поверхности, атмосферы и ионосферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 53. № 1. С. 53–63.
- Зотов О.Д., Гульельми А.В., Собисевич А.Л.* О магнитных предвестниках землетрясений // Физика Земли. 2013. № 6. С. 139–147.
- 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.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Мейстер К.-В., Липеровская Е.В.* Физические модели связей в системе литосфера-атмосфера-ионосфера перед землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 6. С. 831–843.
- 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.
- Романова Н.В., Пилипенко В.А., Степанова М.В.* О магнитном предвестнике Чилийского землетрясения 27 февраля 2010 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 2. С. 231–234.
- Руленко О.П.* Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57–68.
- Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Канониди К.Х.* Результаты анализа инструментальных наблюдений аномальных геомагнитных возмущений, наведенных землетрясениями в геосферах. Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС. 2013. С. 329–341.
- Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Лиходеев Д.В.* О гравимагнитных возмущениях, предвещающих сейсмические события // Докл. РАН. 2017. Т. 475. № 4. С. 444–447.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1983. 312 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестников. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Сорокин В.М., Федорович Г.В.* Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат. 1982. 136 с.
- Сурков В.В.* Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ. 2000. 448 с.
- Филиппов Л.Д., Степанов А.Е., Смирнов В.Ф.* Ионосферное проявление воздействия фронта АГВ от землетрясений в Восточно-Сибирском регионе. Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV международная конференция 14–17 августа 2007 г., с. Паратунка, Камчатская область: Сборник докладов. Петропавловск-Камч.: ИКИР ДВО РАН. 2007. С. 459–463.
- 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.
- Chum J., Hruska F., Zednik J., Lastovicka J.* Ionospheric disturbances (infrasonic waves) over the Czech republic excited by the 2011 Tohoku earthquake // Journal of Geophysical Research. 2012. V. 117. A08319. doi:10.1029/2012JA017767
- Iyemori T., Nose M., Han D., Gao J., Hashizume M., Choosakul N., Shinagawa H., Tanaka J., Utsugi M., Saito A., McCreddie H., Odagi J., Yang F.* Geomagnetic pulsations caused by the Sumatra earthquake on December 26, 2004 // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32. L20807. doi:10.1029/2005GL024083
- Fenoglio M.A., Johnston M.J.S., Byerlee J.* Magnetic and electric fields associated with change in high pore pressure in fault zones – application to the Loma Prieta ULF emission // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 12951–12958.
- Fitterman D.V.* Theory of electrokinetic-magnetic anomalies in a faulted half-space // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. № 11. P. 6031–6040.
- 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. Vol. 15. № 3. P. 329–360.
- Hayakawa M.* Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes. Tokyo: TERRAPUB. 1999. 996 p.
- Ishido T., Mizutani H.* Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena to rock-water systems and its applications to geophysics // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 1763–1775.
- 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.
- Merzer M., Klemperer S.L.* Modelling low-frequency magnetic-field precursor to the Loma Prieta earthquake with a precursory increase in fault-zone conductivity // Pure and Applied Geophysics. 1997. V. 150. P. 217–248.
- Mizutani H., Ishida T., Yokokura T., Ohnishi S.* Electrokinetic phenomena associated with earthquakes // Geophys. Res. Lett. 1976. V. 3. P. 365–368.
- Sasai Y.* Tectonomagnetic modeling on the basis of the linear piezomagnetic effect // Bull. Earthquake Res. Inst., University of Tokyo. 1991. V. 66. P. 585–722.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/848467>

Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y., Nishioka M., Maruyama T., Kato H., Nagatsuma T., Murata K.T. Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 Tohoku earthquake // *Earth, Planets and Space*. 2011. V. 63. № 7. P. 875–879.

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) // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2013. V. 77. P. 59–65.

Geomagnetic Variations during Strong Earthquakes

A. A. Spivak^{a,*} and S. A. Riabova^a

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

^{*}*E-mail: spivak@idg.chph.ras.ru*

Received April 9, 2019

We analyze the geomagnetic effect caused by the strong earthquakes using the data from the Geophysical Observatory «Mikhnevo» (MHV) of the Institute of Geosphere of the Russian Academy of Sciences (IDG RAS) and from a number of observatories of the international INTERMAGNET network. It is shown that seismic events are accompanied by characteristic variations in the Earth's magnetic field. These induced geomagnetic variations contain a clearly pronounced short-period component with a period of ~0.5–0.8 min which is recorded during shallow earthquakes and a long-period component (~5–20 min) observed in the most cases. The maximum amplitudes of the induced geomagnetic variations are ~1.5–5 and ~2–20 nT for the short-period and long-period components, respectively. It is noted that the induced geomagnetic perturbations recorded by the observatories at significantly different distances from the source of the earthquake feature almost simultaneous and morphologically similar behavior.

Keywords: earthquake, geomagnetic field, variations