

О ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЯХ, НАБЛЮДАЕМЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И ПРИУРОЧЕННЫХ К СИЛЬНЫМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ

© 2022 г. С. А. Рябова^{1, 2, *}, С. Л. Шалимов²

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

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: riabovasa@mail.ru

Поступила в редакцию 21.01.2022 г.

После доработки 02.03.2022 г.

Принята к публикации 03.03.2022 г.

С использованием цепочки наземных среднеширотных магнитометрических пунктов наблюдения, разнесенных на расстояния в несколько тысяч километров, исследована интенсификация вариаций геомагнитного поля, приуроченная к ряду сильных удаленных землетрясений. Показано, что спектральные пики вариаций в диапазоне 5–13 мин (диапазон магнитных пульсаций Pc5–Pc6) могут быть обусловлены соответствующими вариациями компонент межпланетного магнитного поля. Геомагнитные вариации с периодами больше 13 мин интерпретированы как результат распространения медленных магнитогидродинамических (МГД) волн, возбужденных в ионосфере акустическим импульсом после землетрясений, или как результат прохождения перемещающихся ионосферных возмущений.

Ключевые слова: землетрясение, геомагнитное поле, вариации, медленные магнитогидродинамические (МГД) волны, межпланетное магнитное поле, перемещающиеся ионосферные возмущения.

DOI: 10.31857/S0002333722040081

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые на земной поверхности геомагнитные вариации регистрируются в достаточно широком диапазоне периодов: от вековых вариаций (длительностью десятки–сотни лет) до вариаций длительностью несколько минут — доли секунд. Столь же широк диапазон процессов, информация о которых эти вариации приносят: движения в жидком ядре Земли, геомагнитные пульсации, представляющие собой короткопериодные колебания геомагнитного поля и характеризующиеся квазипериодической структурой, занимая ультранизкочастотный (УНЧ) диапазон частот от мГц до Гц, шумановские резонансы, ионосферный альвеновский резонатор, шумовой сигнал увеличенной амплитуды вблизи грозовых фронтов и квазипериодические сигналы после спрайтов, прохождение солнечного терминатора и внутренних атмосферных волн через ионосферу [Брагинский, 1982; Куницын, Шалимов, 2011; Сомников, 1983; Троицкая, Гульельми, 1969; Belyaev et al., 1990; Fraser-Smith, 1993; Fullekrug et al., 1998; Shalimov, Bosinger, 2006; 2008]. Во всех этих исследованиях источником магнитных сигналов считают магнитосферу, ионосферу или атмосферу.

Кроме этого, существуют измерения в УНЧ диапазоне, приуроченные ко времени подготов-

ки (за несколько часов–дней до события) достаточно сильных (с магнитудой $M \geq 7$) землетрясений и рассматриваемые как предвестники приближающегося события (см., например, [Собисевич и др., 2009; 2010; Fraser-Smith et al., 1990; Hayakawa et al., 1996; Kopytenko et al., 1993]). Авторы подобных исследований убеждены в литосферном происхождении регистрируемых сигналов. Согласно гипотезе, эти сигналы обусловлены разрушением среды в зоне очага или в пределах зоны подготовки [Сурков, 2000]. Однако подобные результаты разрозненных наблюдений не имеют строгого обоснования, а некоторые из них оспариваются (см., например, [Костерин и др., 2015; Куницын, Шалимов, 2011; Thomas et al., 2009a; 2009b]). При этом возражения основываются на тщательном учете других, не литосферных, источников УНЧ вариаций, о которых сказано выше.

С другой стороны, появление УНЧ сигналов после землетрясений, казалось бы, не вызывает сомнений в их источнике. Так, после землетрясения в Тохоку (2011 г., магнитуда 9), на магнитометрической обсерватории Харьковского университета (расстояние до эпицентра 7830 км) были обнаружены цуги колебаний геомагнитного поля с периодом 400–900 с, которые могли быть вы-

Таблица 1. Пункты геомагнитных наблюдений

Наименование пункта наблюдения	Обозначение	Широта, град.	Долгота, град.	Месторасположение
Бельск	BEL	51.84	20.79	Польша, г. Бельск
Борок	BOX	58.07	38.23	Россия, Ярославская обл., пос. Борок
Чхонъян	CYG	36.37	126.85	Южная Корея, Чхунчхон-Намдо
Иркутск	IRK	52.17	104.45	Россия, Иркутск, пос. Патроны
Какиока	КАК	36.23	140.19	Япония, г. Какиока
Хабаровск	КНВ	47.61	134.69	Россия, г. Хабаровск
Киев	KIV	50.72	30.3	Украина, пос. Дымер
Каноя	KNY	31.42	130.88	Япония, г. Каноя
Львов	LVV	49.9	23.75	Украина, г. Львов
Ланьчжоу	LZH	36.09	103.85	Китай, г. Пекин
Мемамбецу	MMB	43.91	144.19	Япония, г. Мемамбецу
Новосибирск	NVS	55.03	82.90	Россия, Новосибирская обл., Ключи
Паратунка	PET	53.10	158.63	Россия, Камчатская обл., Елизовский р-н, с. Паратунка
Санкт-Петербург	SPG	60.54	29.72	Россия, г. Санкт-Петербург

званы воздействием сейсмических и акустико-гравитационных волн на ионосферную плазму. При этом первым соответствовали скорости 2.2–3.5 км/с, вторым – 250–800 м/с. Амплитуда наблюдавшихся цугов магнитных колебаний достигала 1.5–2.5 нТл, а длительность – 60–80 мин [Черногор, 2019]. Кроме этого, были обнаружены длиннопериодные (20, 60 и 100–120 мин) почти синхронные геомагнитные вариации с амплитудой 4–8 нТл, последовавшие за землетрясением. При этом станции располагались на расстояниях 640–7200 км, а время начала вариаций после события было 16.5 мин для ближайшей станции и 21.5 мин – для самой дальней. Существенно, что время запаздывания переднего фронта этих возмущений увеличивалось при увеличении расстояния между эпицентром и пунктами наблюдений, причем их амплитуда при этом убывала. Это дало основание автору [Черногор, 2019] сделать вывод, что, скорее всего, возмущения геомагнитного поля переносились медленными МГД волнами (скорости этих волн – несколько десятков км/с [Сорокин, Федорович, 1982; Сурков, 2000]). Таким образом, хотя и дано указание на источник возмущений, но пока нет ясности распространяется ли этот вывод на другие, менее сильные (чем землетрясение в Тохоку) события.

В свете сказанного выше экспериментальное исследование УНЧ вариаций геомагнитного поля, регистрируемых на земной поверхности и приуроченных к сильным удаленным землетрясениям, а также анализ возможных источников этих вариаций, представляется актуальным. Особенностью этих вариаций является очень близкое

по времени появление похожих по спектральному составу колебаний на магнитометрических станциях, удаленных друг от друга на тысячи километров. Поэтому тщательное исследование источников вариаций позволит ответить на вопрос в какой степени они могут быть обусловлены сейсмическими событиями или иными причинами.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

При выполнении настоящих исследований в качестве исходных привлекались данные регистрации магнитной индукции на земной поверхности, выполненной на обсерваториях международной сети ИНТЕРМАГНЕТ. Географические координаты и месторасположение обсерваторий приведены в табл. 1. На каждой из обсерваторий выполняется трехкомпонентная регистрация геомагнитного поля.

В настоящей работе также привлекались данные регистрации геомагнитного поля на среднеширотной Геофизической обсерватории “Михнево” Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, Россия, Московская область, п. Михнево (МНВ, координаты: 54.959° N; 37.766° E).

Регистрация геомагнитных вариаций на МНВ выполнялась с помощью автоматического феррозондового магнитометра LEMI-018i с точностью измерений 10 пТл. Результаты регистрации геомагнитного поля на обсерватории “Михнево” размещены на сайте Института динамики геосфер РАН [<http://www.idg.chph.ras.ru/~mikhnevo/>].

Таблица 2. Параметры рассматриваемых сейсмических событий

№	Дата	Время, UT	Координаты	Глубина	Регион	Магнитуда
1	24.01.2018	10:51	41.103° N 142.432° E	31.0	99 км от г. Мисава	6.3
2	05.09.2018	18:08	42.686° N 141.929° E	35.0	27 км от г. Титосэ	6.6
3	08.01.2019	12:39	30.587° N 131.044° E	35.0	16 км от г. Нисиноомотэ	6.3
4	04.08.2019	10:23	37.759° N 141.603° E	38.0	61 км от пос. Намиэ	6.3
5	19.04.2020	20:39	38.895° N 142.005° E	38.0	31 км от г. Офунато	6.3
6	12.09.2020	02:44	38.748° N 142.245° E	34.0	58 км от г. Офунато	6.1
7	20.12.2020	17:23	40.867° N 142.581° E	35.0	100 км от г. Хатинохе	6.3
8	13.02.2021	14:08	37.727° N 141.775° E	44.0	73 км от пос. Намиэ	7.1
9	20.03.2021	09:10	38.452° N 141.648° E	43.0	30 км от г. Исиномаки	7.0
10	01.05.2021	01:27	38.200° N 141.597° E	43.0	35 км от г. Исиномаки	6.9
11	13.05.2021	23:58	37.717° N 141.817° E	32.0	76 км от пос. Намиэ	6.0

Чтобы обеспечить возможность проведения сопоставления, данные магнитной регистрации приводились к единой географической системе координат и к всемирному координированному времени (UTC). Для анализа использовались ряды цифровых данных, сформированные с дискретностью 1 мин.

В настоящей работе в качестве примера рассматриваются вариации геомагнитного поля в период землетрясений, произошедших в Японии с 2018 по 2021 гг. с магнитудой, превышающей 6 (табл. 2). При этом анализировались геомагнитные вариации, сопутствующие мелкофокусным сейсмическим событиям, которые характеризовались глубиной очага от 30 до 50 км.

На первом этапе выполнялся отбор событий с привлечением данных о вариациях геомагнитных станционных K (обсерватории MNV [<http://www.idg.chph.ras.ru/~mikhnevo/>] и КАК [<http://www.kakioka-jma.go.jp/>]) и Kp индексов [<https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>] и с привлечением данных о сейсмических событиях и их параметрах [<https://earthquake.usgs.gov/>].

Кроме анализа изменения временных вариаций, обусловленных сейсмическими событиями, в настоящей работе в качестве основного метода исследования использовался спектральный анализ. Здесь следует отметить, что основное назначение спектрального анализа – выделение частот регулярных составляющих сигнала, зашумленного помехами. В дополнение к спектральному анализу геомагнитных вариаций, зарегистрированных на разных обсерваториях в период землетрясений, в настоящей работе выполнялся анализ спектра вариаций B_z -ММП¹ [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>].

При выполнении исследований спектры вычислялись методом периодограмм. Здесь следует

¹ Межпланетное магнитное поле.

отметить, что применение других видов спектрального анализа (оценка спектральной мощности методом Уэлча, методом Ломба–Скаргла, методом Юла–Уокера) [Адушкин и др., 2021] к цифровым данным, используемым в настоящей работе, показало целесообразность использования классических преобразований Фурье. Использование этого вида вычислительно эффективно и в рассматриваемом диапазоне периодов (от 5 до 40 мин) позволяет выделить все спектральные гармоники, как и при применении других видов спектрального анализа.

В основе классического метода спектрального анализа лежит применение дискретного преобразования Фурье (ДФФ) [Александров, 2002]:

прямого:

$$X_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \exp\left(-\frac{j2\pi i k}{n}\right),$$

обратного:

$$X_i = \sum_{k=1}^n X_k \exp\left(-\frac{j2\pi i k}{K}\right),$$

где: Δt – шаг дискретизации; i соответствует времени $t_i = i \Delta t$; k – частоте $f_k = \frac{n}{k \Delta t}$.

Исходная неусредненная форма периодограммной оценки спектра мощности [Марпл, 1990; Кривошеев, 2006]:

$$P(f) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_n \exp\left(\frac{i2\pi f n \Delta t}{K}\right).$$

Таблица 3. Геомагнитная обстановка в период рассматриваемых сейсмических событий

№	Дата	МНУ		КАК		Kp_m	Kp_{max}
		K_m	K_{max}	K_m	K_{max}		
1	24.01.2018	1	2	1	2	1	2
2	05.09.2018	2	3	2	3	2	3
3	08.01.2019	2	1	2	2	1	2
4	04.08.2019	2	3	1	3	1	2
5	19.04.2020	0	1	0	1	0	1
6	12.09.2020	1	1	0	1	1	1
7	20.12.2020	2	1	2	2	1	1
8	13.02.2021	2	3	2	4	3	4
9	20.03.2021	4	3	6	5	5	6
10	01.05.2021	2	3	1	2	1	2
11	13.05.2021	2	2	2	2	2	1

ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЕРИОД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЯПОНИИ

Отбор сейсмических событий

На первом этапе выполнения настоящих исследований была проанализирована геомагнитная обстановка в период, включающий время основного толчка. В табл. 3 приведены значения геомагнитных K и Kp индексов в момент основного толчка и максимальные за сутки (6 ч до землетрясения и 3 ч после землетрясения). Анализ данных табл. 3 показал, что события 05.09.2018 г., 13.02.2021 г. и 20.03.2021 г. ($Kp \geq 3$, $K(\text{МНУ}) \geq 3$, $K(\text{КАК}) \geq 3$) стоит исключить из дальнейшего рассмотрения, поскольку запись в период этих землетрясений будет искажена вариациями магнитного поля, вызванными источниками солнечного происхождения. Также в рамках настоящих исследований было исключено рассмотрение геомагнитных вариаций за 04.08.2019 г. (индексы геомагнитной активности на обсерваториях “Михнево” и “Какиока” в трехчасовой интервал непосредственно перед событием были равны 3, что не исключает сильную составляющую в геомагнитных вариациях несейсмической природы).

Существенные помехи при анализе временных вариаций геомагнитного поля, сопутствующих конкретному землетрясению, могут вносить также геомагнитные вариации от других сильных землетрясений, подземные толчки которых близки по времени к моменту основного толчка рассматриваемого события. В частности, по данным Геологической службы США примерно за 8 мин (20:31 UTC) до основного толчка землетрясения в Японии (20:39 UTC) 19.04.2020 г. произошло землетрясение на Филиппинах магнитудой 4.7 (координаты очага: 6.776° N, 124.975° E, глубина 10.0 км); примерно за 4 мин (02:37) до основного толчка землетрясения в Японии (02:41 UTC) 12.09.2020 г.

произошло землетрясение на Фиджи магнитудой 5.6 (координаты очага: 17.880° S 178.005° W, глубина 559.7 км); примерно за 3 мин (23:55 UTC) до основного толчка землетрясения в Японии (23:58 UTC) 13.05.2021 г. произошло землетрясение в Колумбии магнитудой 4.3 (координаты очага: 6.736° N 72.976° W, глубина 156.4 км). Поскольку разделение эффектов от различных сейсмических событий на данном этапе исследований не представлялось возможным, при дальнейшем анализе геомагнитные данные за 19.04.2020 г., 12.09.2020 г. и 13.05.2021 г. не использовались. В том числе нецелесообразно было привлекать в ходе анализа данные геомагнитного мониторинга за 01.05.2021 г. из-за возможного наложения на геомагнитный отклик от землетрясения в Японии аномалий магнитного поля Земли, сопутствующих следующим сейсмическим событиям: 1) землетрясению в Сомали магнитудой 4.7 (01:47:21 UTC, 13.238° N 51.067° E, 10 км), 2) землетрясению в Индонезии магнитудой 4.5 (01:47:28 UTC, 1.353° N 96.904° E, 10 км).

Анализ данных геомагнитного мониторинга в периоды отобранных сейсмических событий

Примеры регистрации вариации геомагнитного поля в период землетрясений в Японии с глубиной гипоцентра от 30 до 50 км за период 2018–2021 гг. на ряде обсерваторий сети ИНТЕРМАНЕТ [<https://www.intermagnet.org/>] и Геофизической обсерватории “Михнево” приведены на рис. 1–рис. 3.

Первое землетрясение произошло в районе префектуры Аомори на северо-востоке Японии в 10:51 UTC 24.01.2018 г. (19:51 JST) и имело магнитуду 6.3. По данным Геологической службы США очаг залегал на глубине 31 км и находился в 99 км от города Муцу (в районе острова Хоккайдо). Координаты очага: 41.103° N 142.432° E.

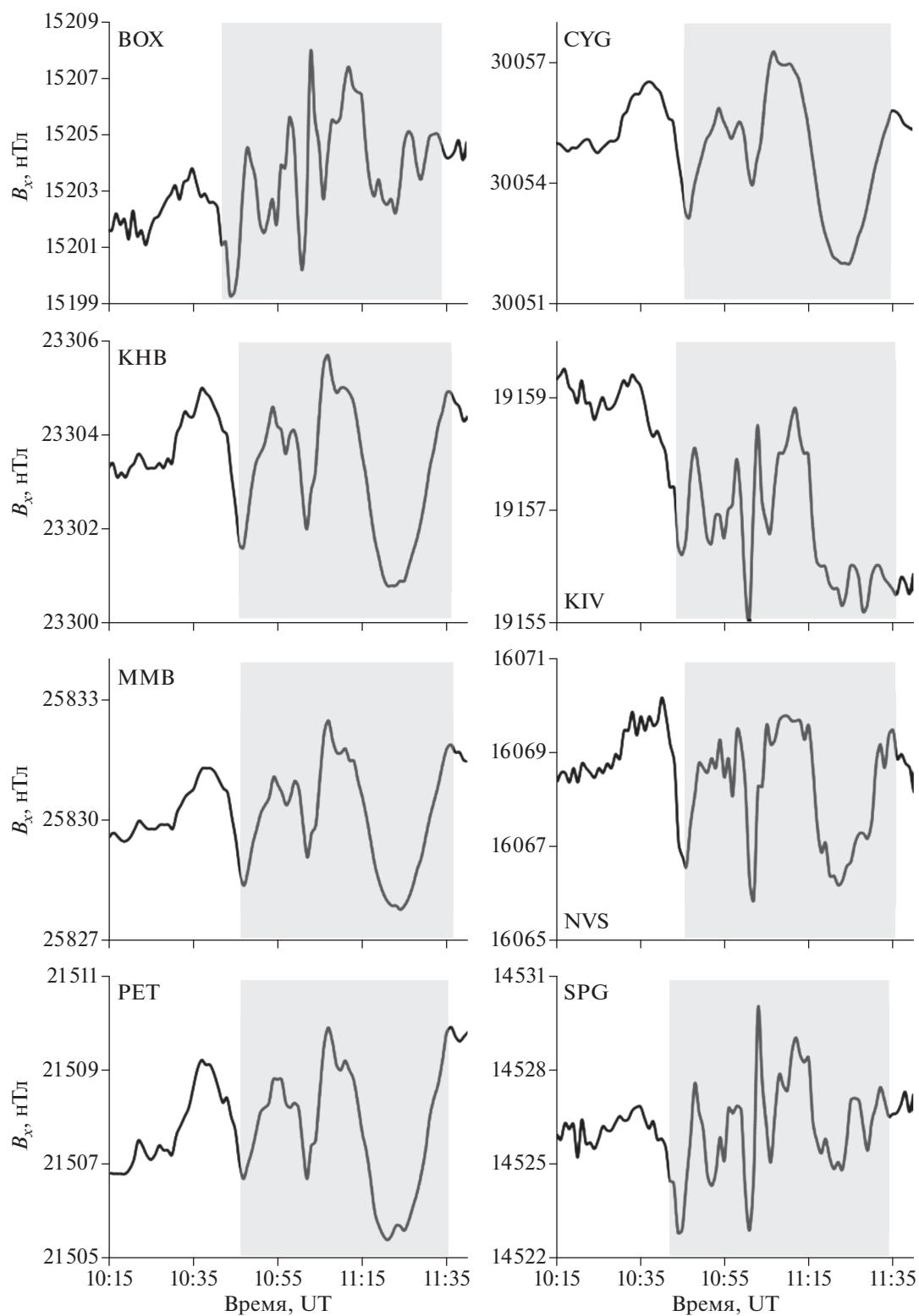


Рис. 1. Вариации B_x -компоненты геомагнитной индукции, зарегистрированные на обсерваториях ИНТЕРМАГНЕТ в период землетрясения в Японии 24.01.2018 г.; здесь и на следующих рисунках фоном выделено геомагнитное возмущение, сопутствующее землетрясению.

Представленные на рис. 1 данные свидетельствуют о ярко выраженных вариациях магнитного поля в период землетрясения. В записях магнитного поля в период землетрясения 24.01.2018 г. отчетливо проявляются длиннопериодные геомагнитные вариации повышенной амплитуды, начало² которых зафиксировано примерно за 4–6 мин до основного толчка. Период³ вариаций, хорошо выделяемый на фоне суточного фона, составляет примерно 15–17 мин по данным разных обсерваторий. Максимальная амплитуда вариаций⁴ составила 2 нТл. Общая длительность возмущений⁵ – примерно 35–50 мин.

Второе землетрясение произошло недалеко от восточного побережья острова Хонсю, Япония, в 17:23 UTC 20.12.2020 г. (02:23 JST, 21 декабря) и имело магнитуду 6.3. По данным Геологической службы США эпицентр подземных толчков был примерно в 95 км к северо-востоку от города Хатинохе на севере острова Хонсю, а очаг располагался на глубине 35 км. Координаты очага: 40.867° N 142.581° E.

На рис. 2 приведены примеры записи геомагнитных вариаций в период Японского землетрясения 20.12.2020 г. Из рис. 2 можно видеть, что в примерно 17:43–18:04 UTC, т.е. через 20–41 мин после события, на расстояниях $R = 360$ (MMB) – 8300 (LLV) км от эпицентра соответственно существенно изменилось поведение северной горизонтальной компоненты магнитного поля Земли. В записях, представленных на рис. 2, хорошо проявляются длиннопериодные повышенные геомагнитные вариации с периодом примерно 20–30 мин. В этом случае длительность длиннопериодных вариаций составила примерно 2 ч. На разных обсерваториях максимальная амплитуда вариаций не превышала 2 нТл. Характерной особенностью является линейное повышение индукции магнитного поля относительно фоновых значений на обсерваториях, расположенных от очага землетрясения на расстояниях $R = 360$ (MMB) – 1800 (PET) км, причем по мере удаления от эпицентра линейное приращение индукции магнитного поля уменьшается от 8 (MMB) до 5 (PET) нТл.

Третье отобранное землетрясение магнитудой 6.3 произошло в 12:39 UTC 08.01.2019 г. (21:39 JST)

² Начало геомагнитных возмущений определялось по времени существенного изменения характера вариаций геомагнитного поля относительно фона, а также по изменению их частотного состава.

³ Период геомагнитных возмущений определялся как регулярный интервал, через который значения компоненты геомагнитного поля повторялись [Бахмутский, 2011].

⁴ Максимальная амплитуда геомагнитных возмущений – максимальное отклонение вариаций геомагнитного поля относительно тренда [Бахмутский, 2011].

⁵ Окончание геомагнитных возмущений определялось по выходу вариаций на величину фоновых значений [Хаттон и др., 1989].

на юго-западе Японии в районе острова Танэгасима. По данным Геологической службы США очаг располагался на глубине 35 км, в Тихом океане в 116 км от г. Кагосима. Координаты очага: 30.587° N 131.044° E.

Анализ данных геомагнитного мониторинга в период землетрясения 08.01.2019 г., приведенных на рис. 3, показал, что примерно за 5 мин до регистрации главного толчка началось бухтообразное повышение с квазипериодическими колебаниями с периодом примерно 9–12 мин. Именно с этим периодом на ряде обсерваторий четко в записях можно увидеть, что до повышения на фоне снижения были зарегистрированы возмущения с той же периодичностью. Однако в 12:46–13:02 UTC, т.е. через 7–23 мин отмечается резкое изменение характера вариаций и наблюдаются возмущения с преимущественным периодом 40 мин, что проявляется при исследовании спектрального состава. По нашему предположению именно эти возмущения могут быть связаны с сейсмическим событием. Здесь следует отметить сходную морфологию этих возмущений и практически совпадение их по времени на разных расстояниях от эпицентра событий. Отметим также, что аналогичное поведение геомагнитного отклика наблюдалось и при других сейсмических событиях, рассмотренных в работах [Спивак, Рябова, 2019а; 2019б].

В табл. 4 приведены основные характеристики геомагнитных возмущений в период трех землетрясений. Из данных табл. 4 следует, что время задержки и продолжительность геомагнитных возмущений растет по мере удаления от эпицентра сейсмического события. Вместе с тем опережение геомагнитных возмущений главного толчка землетрясения 24.01.2018 г. на всех обсерваториях одинаково и составляет 4–6 мин. Продолжительность возмущений демонстрирует слабую зависимость от расстояния.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЕРИОД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЯПОНИИ

Как показывает анализ временных вариаций геомагнитного поля, в период землетрясений в геомагнитных записях проявляются квазипериодические колебания с периодами от 15 до 40 мин. С целью получения более детальной информации об их частотном составе в настоящей работе выполнялось спектральное оценивание⁶.

В качестве примера на рис. 4 приведены спектры горизонтальной B_x -составляющей геомагнитного поля на разных обсерваториях за 24.01.2018 г. Как видно из рис. 4, спектры геомаг-

⁶ Спектральное оценивание выполнялось на временном интервале, соответствующем продолжительности геомагнитных возмущений в период землетрясений.

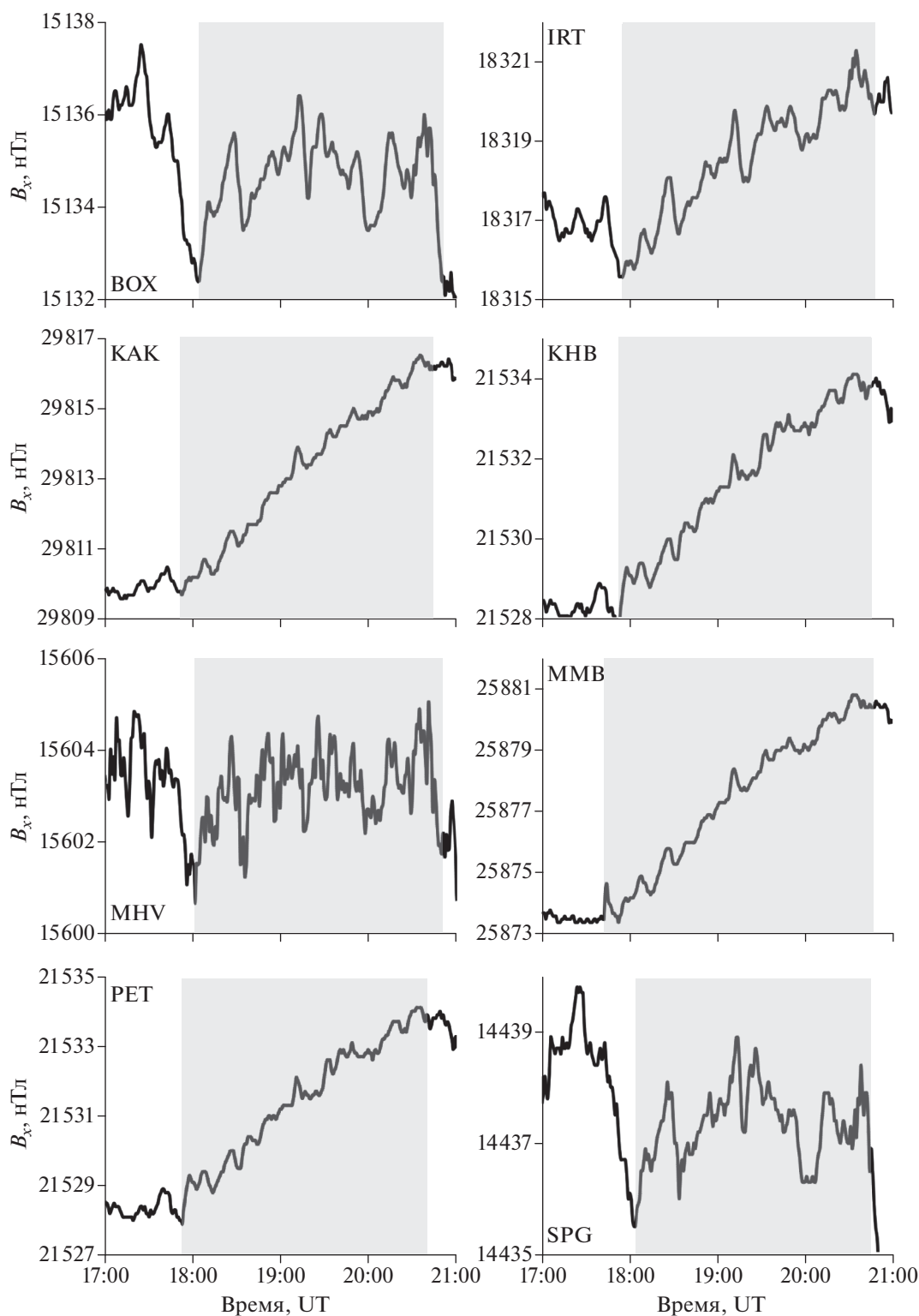


Рис. 2. Вариации B_x -компоненты геомагнитной индукции, зарегистрированные на обсерватории “Михнево” и на обсерваториях ИНТЕРМАГНЕТ в период землетрясения в Японии 20.12.2020 г.

нитных вариаций характеризуются рядом спектральных гармоник: 5.3–5.8 мин, 7.5–8.8 мин, 11.6–13.2 мин и 17–17.5 мин.

Помимо спектрального анализа геомагнитных вариаций в приземном слое атмосферы в ходе настоящих исследований анализировался спек-

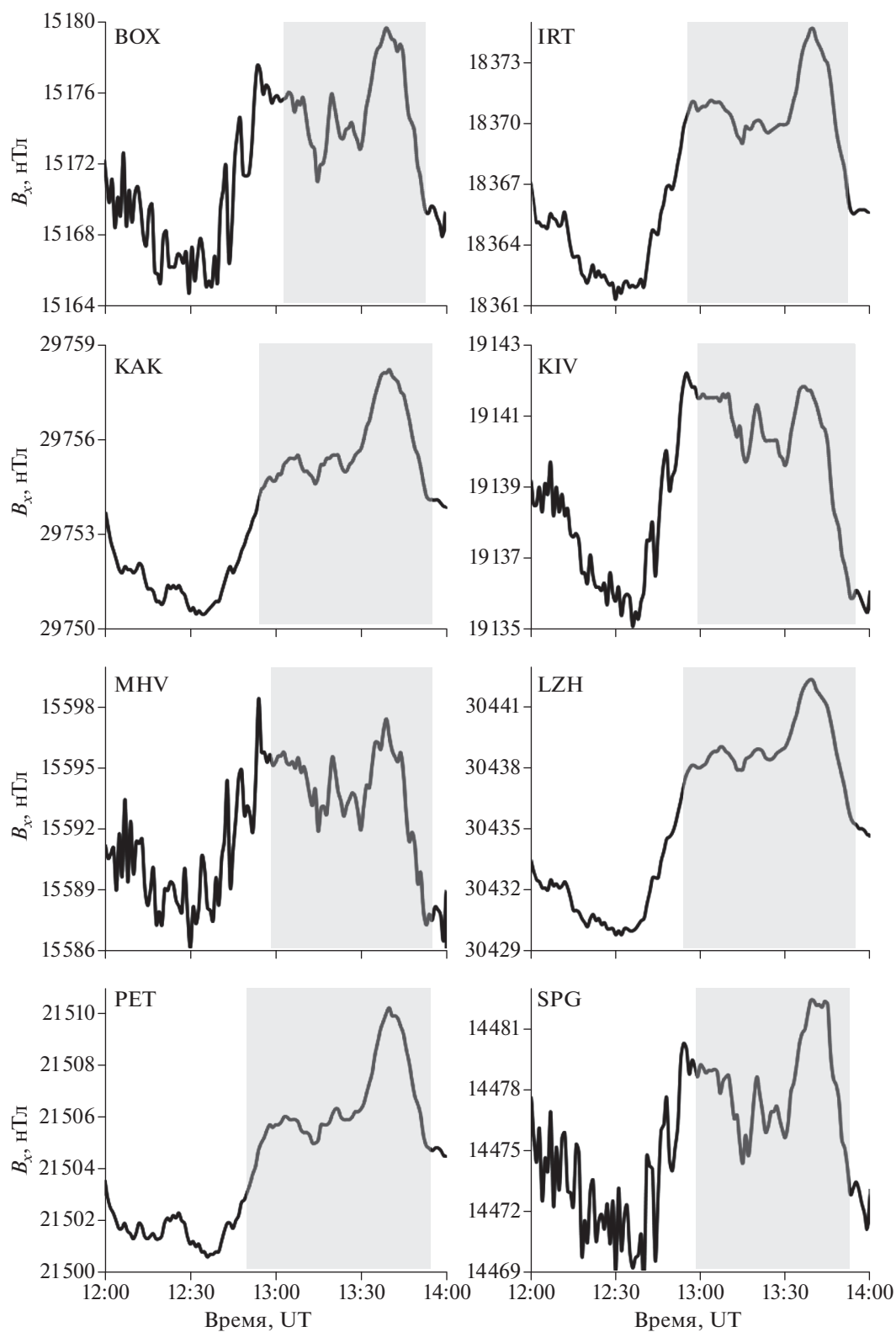


Рис. 3. Вариации B_z -компоненты геомагнитной индукции, зарегистрированные на обсерватории “Михнево” и на обсерваториях ИНТЕРМАГНЕТ в период землетрясения в Японии 08.01.2019 г.

Таблица 4. Параметры геомагнитных возмущений, сопутствующих отобранному сейсмическим событиям

Обсерватория	Землетрясение										
	08.01.2019 г.				20.12.2020 г.				24.01.2018 г.		
	t_0 , мин	ΔT , мин	R , км	V , км/с	t_0 , мин	ΔT , мин	R , км	V , км/с	t_1 , мин	ΔT , мин	R , км
BEL	23	68	8620	7.9	41	172	8280	3.8	7	42	8250
BOX	22	66	7320	7.2	38	171	6990	3.5	6	40	6960
CYG	7	50	750	6.3	15	164	1450	2.5	4	46	1450
IRK	11	65	3230	8.9	20	168	3130	3.5	5	46	3110
КАК	7	59	1050	8.8	28	167	560	0.4	4	35	580
КНВ	9	60	1920	8	10	162	980	3.3	5	50	950
KIV	22	63	8120	7.8	—	—	—	—	6	38	7870
KNY	15	57	95	0.1	15	165	1480	2.5	4	45	1490
LVV	23	68	8570	7.9	41	172	8300	3.8	6	36	8570
LZH	10	60	2590	8.6	—	—	—	—	4	39	2590
MHV	21	61	7470	7.8	39	173	7210	3.5	6	37	7470
MMB	8	60	1880	10.4	20	163	360	0.4	4	43	1880
NVS	14	66	4640	8.6	30	170	4560	3.1	5	40	4640
PET	11	62	3350	9.3	15	166	1820	3	5	38	3350
SPG	20	64	7660	8.5	39	174	7210	3.5	6	42	7180

Примечания: t_0 – задержка геомагнитного возмущения после основного толчка¹; t_1 – опережение геомагнитного возмущения до основного толчка; ΔT – продолжительность геомагнитного возмущения; R – расстояние от места очага землетрясения до пункта геомагнитной регистрации; V – скорость распространения геомагнитного возмущения.

¹ Без учета времени распространения акустической волны до нижней ионосферы.

тральный состав вариаций компонент межпланетного магнитного поля (вмороженного в солнечный ветер), в частности, B_z -ММП как показателя вариаций геомагнитного поля, обусловленных процессами в солнечном ветре. Несмотря на то, что магнитосфера и плазмосфера должны экранировать подобные вариации, в действительности экранировка действует как высокочастотный фильтр [Kelley, 1989], и периоды вариаций менее 8 ч способны проникать с высоких широт на низкие.

В качестве примера на рис. 5а приведен спектр вариаций B_z -ММП за 24.01.2018 г. Анализ спектра, представленного на рис. 5а, показал, что гармоники с периодами 5–6, 8–9 и 12–13 мин, отмеченные в спектре геомагнитных вариаций, отчетливо проявляются и в спектре вариаций B_z -ММП. Однако присутствующая в геомагнитном спектре гармоника с периодом 17 мин не проявляется в спектре вариаций B_z -ММП. Можно предположить, что гармоники (5–6, 7–9 и 12–13 мин) обусловлены процессами в солнечном ветре. Это предположение подтверждает вычисление кросс-спектров между B_z -ММП и горизонтальной B_x -со-

ставляющей геомагнитного поля на разных магнитных обсерваториях.

Таким образом, наблюдаемые на земной поверхности вариации геомагнитного поля (5–6, 7–9 и 12–13 мин), приуроченные к сейсмическим событиям, могут быть обусловлены нестационарными процессами в солнечном ветре. Соответственно, эти геомагнитные вариации не могут иметь непосредственного отношения как к процессу подготовки землетрясения, так и к эффектам последствия.

На рис. 6 представлены результаты спектрального оценивания вариаций горизонтальной B_x -составляющей геомагнитного поля в период землетрясений 20.12.2020 г. В спектрах на различных расстояниях присутствуют гармоники (5–6.5, 8–9.5 и 11–13 мин), которые по нашему предположению связаны с процессами в солнечном ветре. Эти же гармоники наблюдаются и в спектре B_z -ММП (рис. 5б). Кроме того, во всех геомагнитных спектрах (рис. 6) четко проявляется гармоника с периодом 15–17 мин. Однако в больших периодах несколько различается спектральный состав геомагнитных вариаций на близко расположенных к эпицентру обсервато-

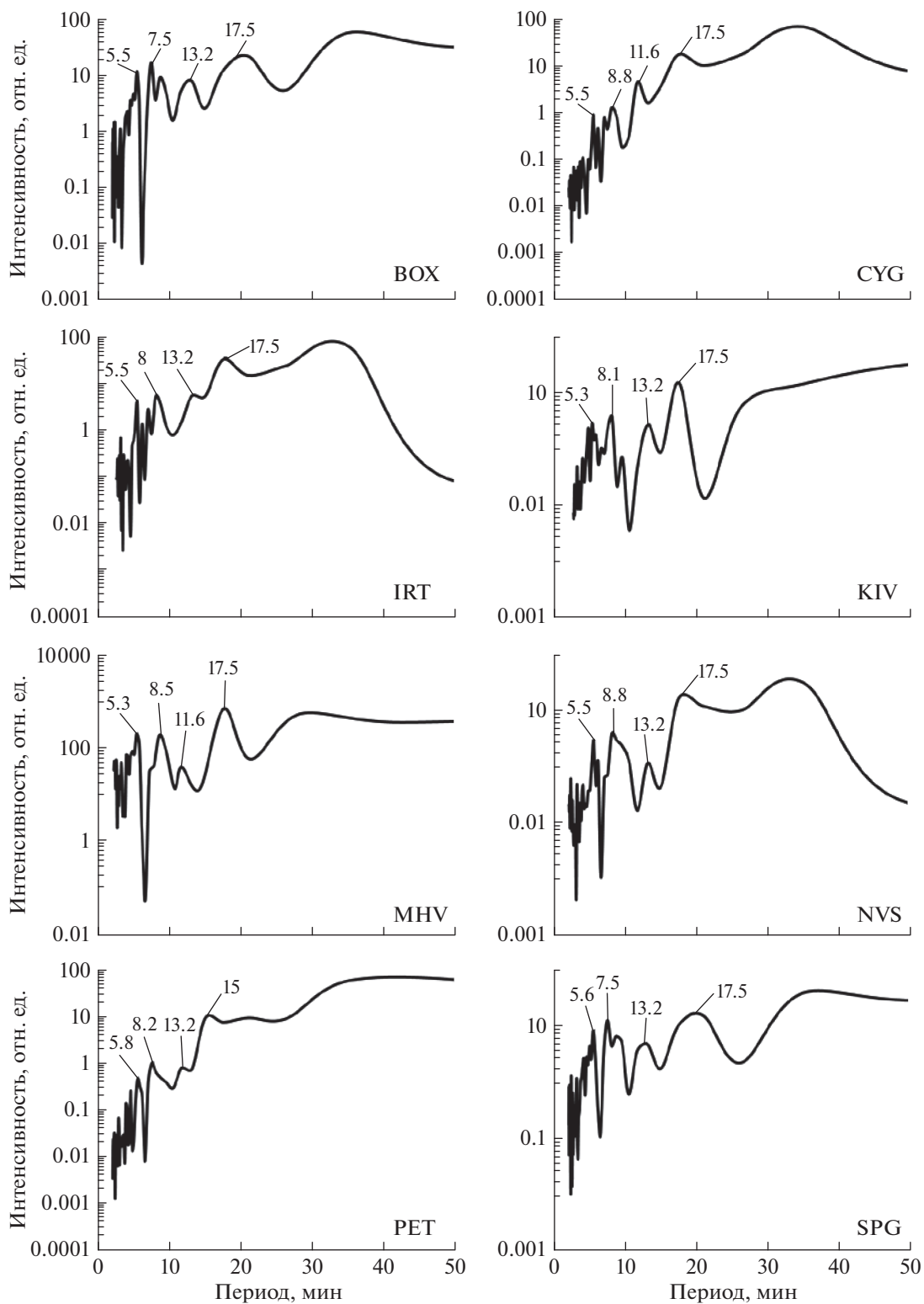


Рис. 4. Периодограммы вариаций B_x -компоненты геомагнитной индукции в период землетрясения в Японии 24.01.2018 г.; здесь и на следующих рисунках в поле рисунка приведены периоды (мин) доминирующих спектральных гармоник.

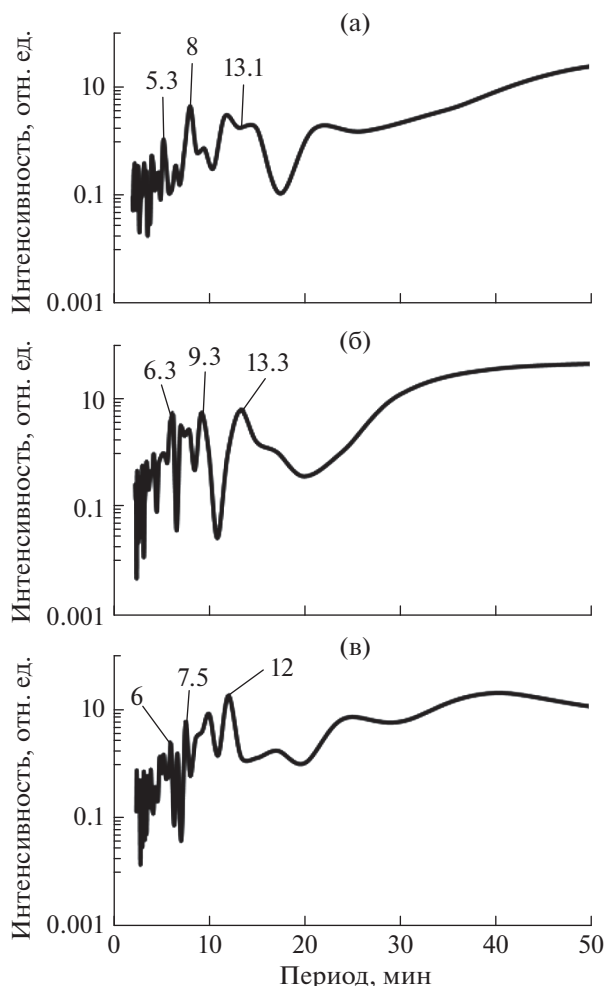


Рис. 5. Периодограммы вариаций B_z -ММП в период землетрясений в Японии: (а) 24.01.2018 г.; (б) 20.12.2020 г.; (в) 08.01.2019 г.

риях и удаленных. В спектрах геомагнитных вариаций на расстоянии от 360 (ММВ) – 1800 (РЕТ) км идентифицируются колебания с периодами 21–24 мин и 30–40 мин, а в спектрах на расстояниях от 3100 (ИРТ) – 8300 (LLV) км четко проявляются только колебания с периодами 21–24 мин⁷.

Интерес представляет спектральный анализ вариаций геомагнитного поля в период последнего отобранного сейсмического события (08.01.2019 г.). В целом в этом случае спектры схожи со спектрами геомагнитных возмущений в период сейсмического события 20.12.2020 г. (примеры вычисленных геомагнитных спектров приведены на рис. 7). Однако почти на всех обсерваториях наблюдается доминирование гармоника 11–13 мин,

⁷ Возможно, что длиннопериодные вариации не удалось идентифицировать из-за низкого разрешения в конце спектра или соответствующие спектральные гармоники лежат вне рассматриваемого диапазона периодов.

которая также доминирует в спектре B_z -ММП (рис. 5в). В спектрах геомагнитных вариаций в период землетрясения 08.01.2019 г. идентифицируются колебания с периодами 30–40 мин.

ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ, ПРИУРОЧЕННЫЕ К СЕЙСМИЧЕСКИМ СОБЫТИЯМ

Как показал анализ предыдущего раздела, не все геомагнитные вариации, наблюдаемые на среднеширотных станциях и приуроченные к удаленным землетрясениям, можно связать с вариациями B_z -ММП. Можно было бы думать, что вариации с периодами больше 13 мин, присутствующие в спектрах анализируемых событий, каким-то образом обусловлены воздействием землетрясений на геомагнитное поле Земли. Здесь, однако, возможны различные сценарии.

Прежде всего, если рассматриваемое возмущение обусловлено землетрясением, то эпицентр является источником акустико-гравитационных волн (АГВ). В частности, акустическая волна, распространяясь до нижней ионосферы (время распространения до нижней ионосферы – около 5 мин), может приводить к возмущениям ионосферной плазмы непосредственно над эпицентром, откуда затем в ионосфере распространяются как атмосферные внутренние гравитационные волны (ВГВ), так и МГД волны [Гохберг, Шалимов, 2008]. Скорости ВГВ в нижней ионосфере ограничены скоростью звука, скорости МГД волн достигают нескольких десятков км/с [Сорокин, Федорович, 1982].

Остановимся подробнее на анализе задержки регистрации геомагнитного возмущения на обсерваториях, расположенных на разном расстоянии от эпицентра землетрясения 20.12.2020 г. (табл. 4). Для ближайших обсерваторий КАК (560 км) и ММВ (360 км) задержка регистрации геомагнитного возмущения составила 28 и 20 мин соответственно. Если принять во внимание, что горизонтальная составляющая атмосферных внутренних гравитационных волн 0.3–0.4 км/с, то можно утверждать, что именно с ними вероятно связана задержка регистрации геомагнитного возмущения на обсерваториях КАК и ММВ. Анализ данных, приведенных в табл. 4, демонстрирует, что на расстояниях свыше 900 км скорость распространения магнитного сигнала значительно выше. Например, расстояние в 980 км магнитное возмущение преодолевает за 5 мин, а в 8300 км за 36 мин, т.е. скорость распространения в этих случаях составляет 3.3 и 3.8 км/с соответственно. Это соответствует скоростям распространения медленных МГД волн в ионосфере.

Аналогичные результаты были получены для сейсмического события 08.01.2018 г. На ближней

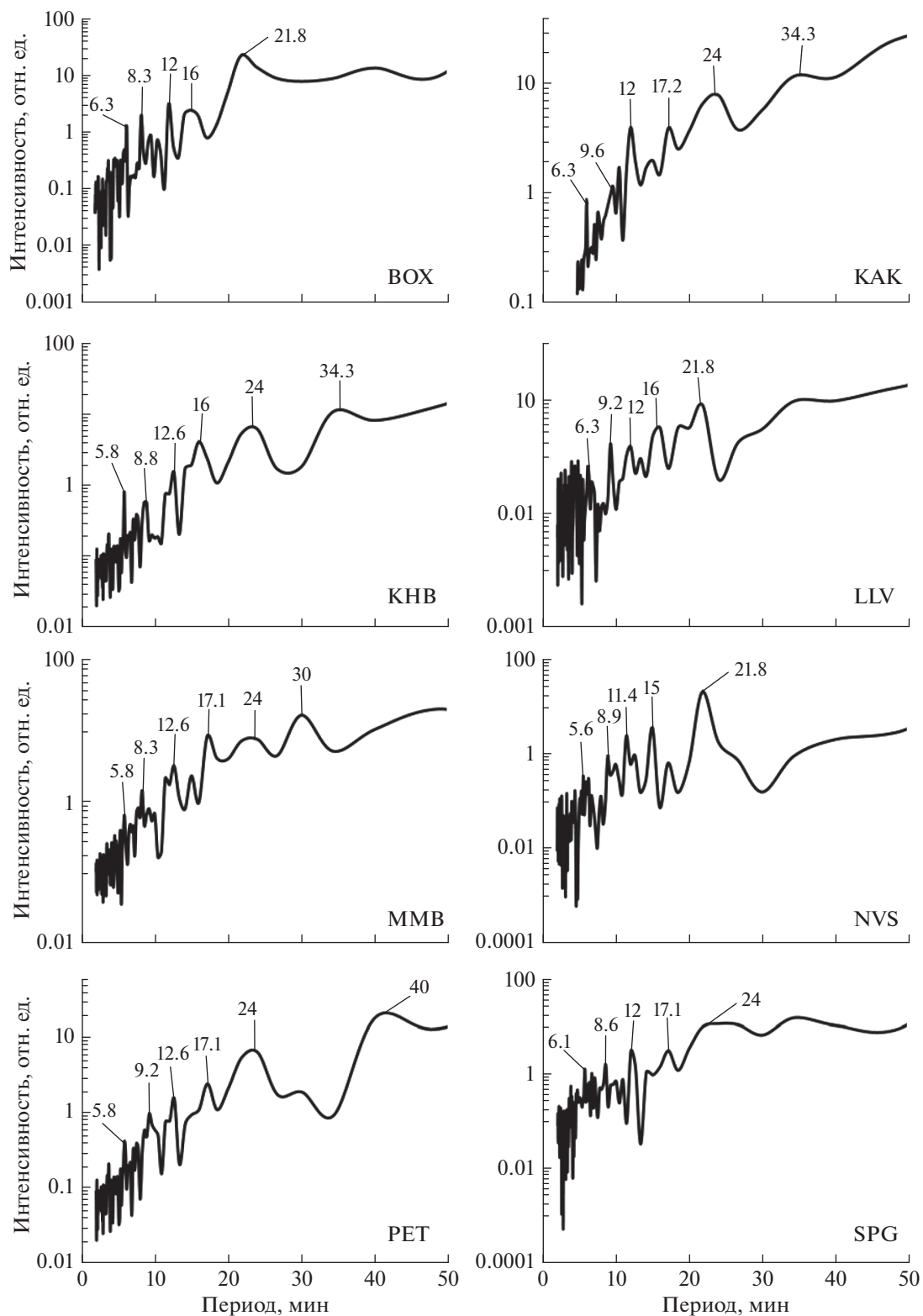


Рис. 6. Периодограммы вариаций B_x -компоненты геомагнитной индукции в период землетрясения в Японии 20.12.2020 г.

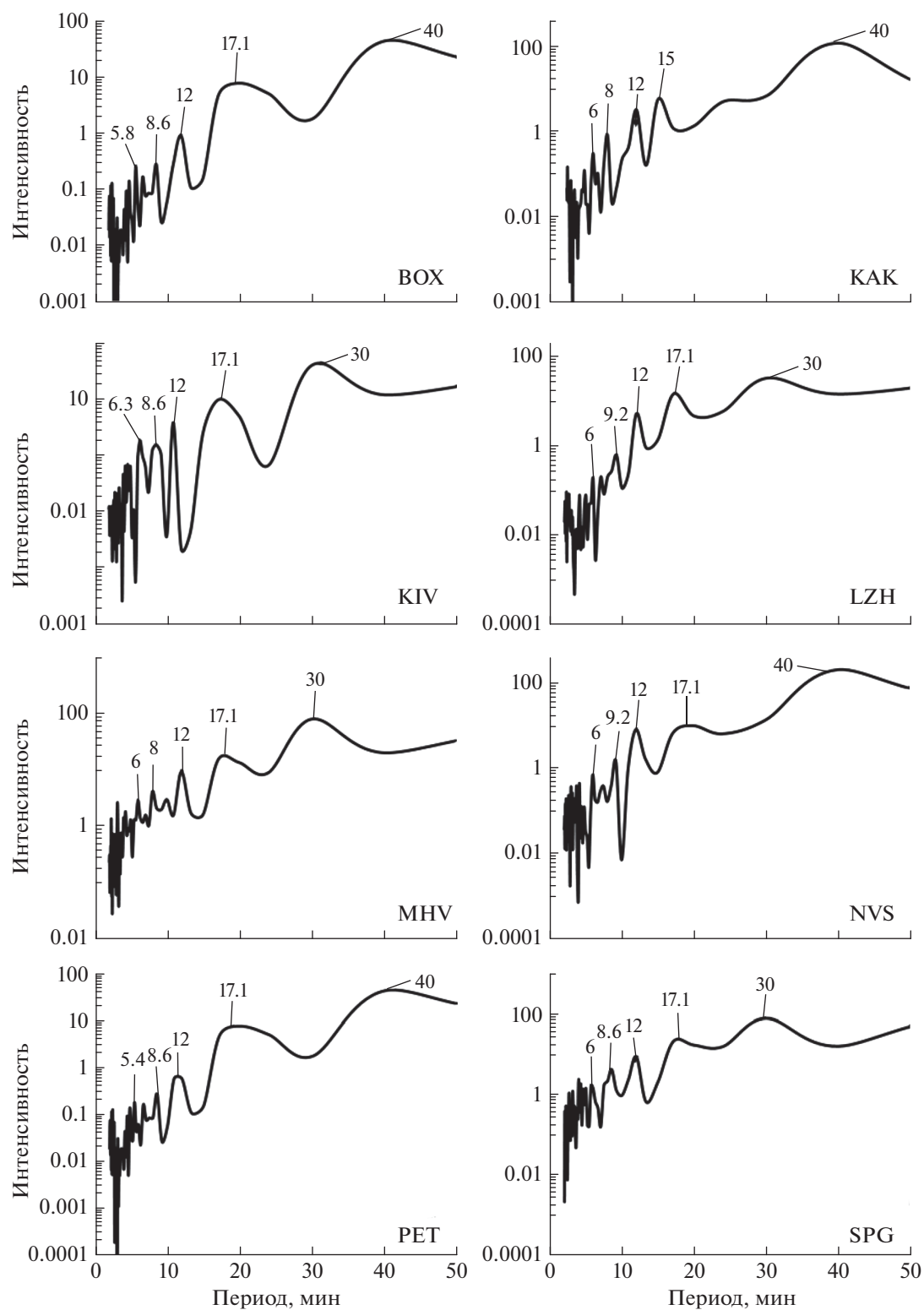


Рис. 7. Периодограммы вариаций B_x -компоненты геомагнитной индукции в период землетрясения в Японии 08.01.2019 г.

станции KNY (95 км) задержка 15 мин вероятно обусловлена приходом внутренней гравитационной волны. Запаздывание регистрации магнитного возмущения на остальных обсерваториях связано с распространением до пункта наблюдения МГД волны (6.3–10.4 км/с⁸).

Кроме этого, возможно распространение ВГВ непосредственно из источника (эпицентра) прямо в ионосферу над пунктом наблюдения. Действительно, из дисперсионного соотношения для незатухающих ВГВ имеем:

$$k_z^2 = k_x^2 (\omega_g^2 / \omega^2 - 1),$$

где ω_g – частота Брента–Вайсяля. При условии $k_z \gg k_x$ получим, что групповая скорость направлена почти горизонтально. Волна, распространяющаяся от земной поверхности на горизонтальное расстояние L_\perp , достигнет ионосферной высоты h (в рассматриваемом случае $h \sim 10^2$ км), когда:

$$v_{g\perp} / v_{gz} \approx \omega_g / \omega = L_\perp / h.$$

Соответственно, период волны, который должен наблюдаться посредством наземного магнитометра, равен $T \approx T_g (L_\perp / h)$, т.е. он будет зависеть от горизонтального расстояния, на котором производится наблюдение. При стандартной вертикальной скорости ВГВ порядка 40 м/с она окажется над точкой наблюдения приблизительно через 40 мин и тогда возможен вклад ВГВ в ионосферное возмущение, которое могло быть обусловлено более ранним приходом МГД волны. Из этой формулы следует, что для событий 08.01.2019 г. (период вариаций 40 мин) и 20.12.2020 г. (период вариаций 20–30 мин) возможный основной вклад в ионосферное возмущение произойдет на расстояниях 800 км и 400–600 км соответственно.

Для события 24.01.2018 г. необходима другая интерпретация, поскольку ионосферное возмущение с периодом 15 мин и его регистрация посредством наземных магнитометров началась за 5 мин до основного толчка. Развитие ионосферного возмущения для рассматриваемых периодов может быть обусловлено типичными ионосферными волновыми возмущениями, наблюдаемыми как вне связи с сейсмическими событиями, так и вне связи с геомагнитными возмущениями (считается, что эти ионосферные возмущения обусловлены нестабильным полярным вихрем [Frissell et al., 2016]). Речь идет о дневных средне-

масштабных перемещающихся ионосферных возмущениях (Medium Scale TIDs), которые имеют протяженность по фронту более 2000 км, обычно наблюдаются зимой и в равноденствие, имеют длины волн 300–1000 км, периоды 10–60 мин и распространяются со скоростями 100–200 м/с на юго-восток до полудня, на юго-запад – после полудня; в промежуточные часы наблюдается переход от одного режима распространения к другому, в результате чего хорошо организованные фронтальные структуры исчезают из-за суперпозиции MSTIDs, распространяющихся в разных направлениях [Kotake et al., 2007; Tsugawa et al., 2007].

Оценка амплитуды магнитного возмущения на земной поверхности от таких MSTIDs с длиной волны $\lambda_0 \geq h$ имеет вид [Куницын, Шалимов, 2011]:

$$B_x = \frac{4\pi}{c} \frac{\Sigma_H}{\Sigma_p + \Sigma_p^*} (\Delta\Sigma_{0P} E_{0x} + \Delta\Sigma_{0H} E_{0y}).$$

Для типичных величин $\Sigma_p \approx 1 \text{ Ом}^{-1}$, $\Sigma_H \approx 3\Sigma_p$, $\Delta\Sigma_{0P} \approx \Delta\Sigma_{0H} \approx 0.1\Sigma_p$, $E_{0x} \approx E_{0y} \approx 1.5 \text{ мВ/м}$ находим $B_x \approx 1 \text{ нТл}$, что соответствует эксперименту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование цепочки наземных среднеширотных магнитометрических пунктов наблюдения, разнесенных на расстояния в несколько тысяч километров, позволило исследовать интенсификацию вариаций геомагнитного поля, приуроченную к ряду сильных удаленных землетрясений. Оказалось, что спектральные пики вариаций в диапазоне 5–13 мин (диапазон магнитных пульсаций Pc5–Pc6) на среднеширотных станциях могут быть обусловлены соответствующими вариациями компонент межпланетного магнитного поля, связанного с процессами в солнечном ветре. На это влияние вариаций компонент ММП обращают недостаточно внимания.

Геомагнитные вариации с периодами больше 13 мин интерпретированы как результат распространения медленных магнитогидродинамических (МГД) волн, возбужденных в ионосфере акустическим импульсом после землетрясений. Однако показано, что не менее важным механизмом генерации наземных геомагнитных вариаций оказывается обычно недооцениваемое прохождение перемещающихся ионосферных возмущений, которые существуют в ионосфере всегда.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Экспериментальные исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН № 1220329000185-5 “Проявление процессов природ-

⁸ Точность оценки скорости распространения зависит от дискретизации записи и точности определения времени начала возмущения.

ного и техногенного происхождения в геофизических полях”, интерпретация результатов выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А.* Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов. М.: ГЕОС. 2021. 264 с.
- Александров В.А.* Преобразование Фурье. Учебное пособие. Новосибирск: НГУ. 2002. 62 с.
- Бахмутский М.Л.* Алгоритм выделения тренда зашумленных больших временных рядов // Программные продукты и системы. 2011. № 4. С. 36–40.
- Брагинский С.И.* Аналитическое описание вековых вариаций геомагнитного поля и скорости вращения Земли // Геомагнетизм и аэрномия. 1982. Т. 22. № 1. С. 115–122.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л.* Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука. 2008. 206 с.
- Костерин Н.А., Пилипенко В.А., Дмитриев Э.М.* О глобальных ультранизкочастотных электромагнитных сигналах перед землетрясениями // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 1. С. 24–34.
- Кривошеев В.И.* Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ). Учебно-методический материал по программе повышения квалификации “Современные системы мобильной цифровой связи, проблемы помехозащищенности и защиты информации”. Н. Новгород: изд-во ННГУ. 2006. 117 с.
- Куницын В.Е., Шалимов С.Л.* Ультранизкочастотные вариации магнитного поля при распространении в ионосфере акустико-гравитационных волн // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2011. № 5. С. 75–78.
- Марпл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир. 1990. 584 с.
- Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л.* Наблюдения УНЧ геомагнитных возмущений, отражающих процессы подготовки и развития цунамигенных землетрясений // Докл. РАН. 2010. Т. 435. № 4. С. 548–553.
- Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л.* Ультранизкочастотные электромагнитные возмущения, возникающие перед сильными сейсмическими событиями // Докл. РАН. 2009. Т. 429. № 5. С. 668–672.
- Сомиков В.М.* Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука. 1983. 192 с.
- Сорокин В.М., Федорович Г.В.* Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат. 1982. 136 с.
- Спивак А.А., Рябова С.А.* Геомагнитные вариации при сильных землетрясениях // Физика Земли. 2019а. № 6. С. 3–12.
- Спивак А.А., Рябова С.А.* Геомагнитный эффект землетрясений // Докл. РАН. 2019б. Т. 488. № 2. С. 197–201.
- Сурков В.В.* Электромагнитные эффекты при взрывах и землетрясениях. М.: МИФИ. 2000. 448 с.
- Троицкая В.А., Гильельми А.В.* Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физических наук. 1969. Т. 97. С. 453–494.
- Хаттон Л., Уэрдингтон М., Мейкин Дж.* Обработка сейсмических данных. Теория и практика. М.: Мир. 1989. 216 с.
- Черногор Л.Ф.* Геомагнитные возмущения, сопровождавшие великое японское землетрясение 11 марта 2011 г. // Геомагнетизм и аэрномия. 2019. Т. 59. № 1. С. 69–82.
- Fraser-Smith A.C., Bernardi A., McGill P.R., Bowen M.M., Ladd M.E., Helliwell R.A., Villard O.G.* Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms7.1 Loma Prieta earthquake // Geophysical Research Letters. 1990. V. 17. № 9. P. 1465–1468.
- Fraser-Smith A.C.* ULF magnetic fields generated by electrical storms and their significance to geomagnetic pulsation generation // Geophysical Research Letters. 1993. V. 20. № 6. P. 467–470.
- Frissell N.A., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Gerrard A.J., Miller E.S., West M.L.* Sources and characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by high-frequency radars in the North American sector // J. Geophysical Research: Space Physics. 2016. V. 121. P. 3722–3739.
<https://doi.org/10.1002/2015JA022168>
- Fullekrug M., Fraser-Smith A.C., Reising S.S.* Ultra-slow tails of sprite-associated lightning flashes // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. № 18. P. 3497–3500.
- Hayakawa M., Itoh T., Smirnova N.* Fractal analysis of ULF geomagnetic data associated with the Guam on August 8, 1993 // Geophysical Research Letters. 1993. V. 20. № 18. P. 2797–2800.
- Kelley M.* The Earth ionosphere: plasma physics and electrodynamics. San Diego, Academic Press. 1989. 487 p.
- Kopytenko Y.A., Ismagulov V.S., Hattori K., Hayakawa M.* Anomaly disturbances of the magnetic fields before the strong earthquake in Japan on March 11, 2011 // Annals of Geophysics. 2012. V. 55. № 1. P. 101–107.
- Sentman D.D.* Schumann resonances // Handbook of Atmospheric Electrodynamics / H. Volland (ed.) Boca Raton, Florida: CRC Press. 1995. V. 1. P. 267–310.
- Shalimov S., Bosinger T.* An alternative explanation for the ultra-slow tail of sprite-associated lightning discharge // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. V. 68. № 7. P. 814–820.
- Shalimov S., Bosinger T.* On the distant excitation of the ionospheric Alfvén resonator by positive cloud-to-ground lightning discharges // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2008. V. 113. № A2. A02303.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012614>
- Thomas J.N., Love J.J., Johnston M.J.S.* On the reported magnetic precursor of the 1989 Loma Prieta earthquake // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2009а. V. 173. С. 207–215.
- Thomas J.N., Love J.J., Johnston M.J.S., Yumoto K.* On the reported magnetic precursor of the 1993 Guam earthquake // Geophysical Research Letters. 2009б. V. 36. № 3. L16301.
<https://doi.org/10.1029/2009GL039020>

On the Geomagnetic Variations Observed on the Earth's Surface and Associated with Strong Earthquakes

S. A. Riabova^{a, b, *} and S. L. Shalimov^b

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

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

**e-mail: riabovasa@mail.ru*

The intensification of geomagnetic variations due to a number of strong remote earthquakes is studied using a chain of ground-based midlatitude magnetic stations located a few thousand km away from each other. It is shown that the spectral peaks of the variations at periods between 5 and 13 min (the range of magnetic pulsations Pc5–Pc6) can be caused by the corresponding variations in the components of the interplanetary magnetic field. Geomagnetic variations with periods longer than 13 min are interpreted as the result of the propagation of slow magnetohydrodynamic (MHD) waves excited in the ionosphere by acoustic pulse after earthquakes or as the result of the passage of travelling ionospheric disturbances.

Keywords: earthquake, geomagnetic field, variations, slow magnetohydrodynamic (MHD) waves, interplanetary magnetic field, traveling ionospheric disturbances