

ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, СОПРОВОЖДАВШИЕ ВЕЛИКОЕ ЯПОНСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 11 МАРТА 2011 г.

© 2019 г. Л. Ф. Черногор*

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина

**e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 03.08.2017 г.

После доработки 27.06.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Проанализированы вариации уровня геомагнитного поля в диапазоне периодов 1–1000 с, зарегистрированные в Магнитометрической обс. Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, сопутствовавшие японскому землетрясению 11 марта 2011 г. Из-за сильной магнитной возмущенности накануне и в день главного толчка магнитный предвестник выделить не удалось. Обнаружены вариации геомагнитного поля, которые последовали за главным ударом. Если они связаны с землетрясением, то скорости распространения возмущений составляли 2.2 км/с и 240–800 м/с. Такие скорости свойственны сейсмической и акустико-гравитационной волнам соответственно. Обнаружены длиннопериодические (20, 60 и 100–120 мин) почти синхронные вариации уровня геомагнитного поля с амплитудой 4–8 нТл, последовавшие за землетрясением. Время запаздывания переднего фронта этих возмущений увеличивалось при увеличении расстояния между эпицентром и обсерваторией, а их амплитуда при этом убывала. Скорее всего, возмущения геомагнитного поля при этом переносились при помощи медленных МГД-волн.

DOI: 10.1134/S0016794019010048

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные возмущения, являясь частью электромагнитных процессов в системе Солнце–межпланетная среда–магнитосфера–ионосфера–атмосфера–земля (внутренние оболочки планеты), несут в себе ценные сведения о строении самой системы и процессах в ней.

Изучению геомагнитных возмущений в этой системе посвящено большое число работ, например, [Пудовкин и др., 1976; Гульельми, 1979; Нишида, 1980; Гульельми и Троицкая, 1983; Лихтер и др., 1988]. В этих работах обсуждаются, в основном, возмущения магнитного поля Земли, вызванные космическими причинами. Геомагнитные и электромагнитные процессы литосферного происхождения детально описаны в ряде монографий, например, [Current ..., 1981; Гохберг и др., 1988; Electromagnetic ..., 1994; Atmospheric ..., 1999; Сурков, 2000; Seismoelectromagnetics ..., 2002; Соболев и Пономарёв, 2003; Molchanov and Hayakawa, 2008; Electromagnetic ..., 2009; Earthquakes ..., 2013; Surkov and Hayakawa, 2014].

1.1. Источники геомагнитных возмущений

Существует четыре основных группы источников геомагнитных возмущений:

– космические источники (солнечный ветер, межпланетная среда, падающие космические тела и др.) [Пудовкин и др., 1976; Гульельми, 1979; Нишида, 1980; Гульельми и Троицкая, 1983; Лихтер и др., 1988; Черногор, 2012, 2013, 2014б, 2017];

– атмосферные источники (грозы, погодные фронты, циклоны и др.), например, [Блиох и др., 1977];

– литосферные (микрорастрескивающиеся породы, флуктуирующее движение в поровой жидкости, разряды статического электричества между разломами и др.), например, [Current ..., 1981; Гохберг и др., 1988; Electromagnetic ..., 1994; Atmospheric ..., 1999; Сурков, 2000; Seismoelectromagnetics ..., 2002; Соболев и Пономарёв, 2003; Molchanov and Hayakawa, 2008; Electromagnetic ..., 2009; Earthquakes ..., 2013; Surkov and Hayakawa, 2014];

– техногенные (мощные взрывы, старты и полеты ракет, мощное радиоизлучение и др.), например, [Сурков, 2000; Гохберг и Шалимов, 2008; Черногор, 2009, 2014б; Chernogor and Blaunstein, 2013; Surkov and Hayakawa, 2014].

Основным источником геомагнитных возмущений являются космические источники. Длительные апериодические возмущения относят к магнитным бурям и суббурям. Квазипериодиче-

ские и нерегулярные сравнительно кратковременные геомагнитные возмущения, именуемые геомагнитными пульсациями, связывают с такими процессами в геокосмосе, как передача волн из солнечного ветра, неустойчивости на границе солнечный ветер — магнитосфера, внезапные деформации магнитосферы, сжатие ночной стороны магнитосферы и т.п.

Период T геомагнитных пульсаций изменяется от ~ 0.1 до 1000 с, длительность от ~ 1 до ~ 100 мин. Амплитуда пульсаций обычно увеличивается при увеличении квазипериода от 0.1–1.0 до 100–500 нТл при T от ~ 1 с до ~ 10 –15 мин. В настоящее время геомагнитные пульсации, вызванные воздействием внемагнитосферных и магнитосферных источников, изучены достаточно хорошо. В то же время генерация геомагнитных пульсаций в магнитосфере и атмосфере падающими крупными телами только начинает изучаться [Черногор, 2013, 2014б, 2017].

Другие, некосмические, источники проявляются значительно реже, чем космические источники. Периоды колебаний и длительность цугов для космических и других источников сопоставимы, чего нельзя сказать об амплитудах. Последние обычно существенно меньше для атмосферных, литосферных и техногенных источников, чем для космических источников и, как правило, изменяются в пределах от ~ 10 пТл до ~ 10 нТл. Это обстоятельство существенно усложняет обнаружение и идентификацию источников некосмического происхождения.

Далее подробнее остановимся на геомагнитных возмущениях литосферного происхождения. Такие возмущения обсуждаются в огромном количестве специальной литературы, например, [Electromagnetic ..., 1994; Atmospheric ..., 1999; Seismoelectromagnetics ..., 2002; Electromagnetic ..., 2009; Earthquakes ..., 2013; Surkov and Hayakawa, 2014].

1.2. Геомагнитный эффект свершившихся землетрясений

В отличие от геомагнитных предвестников, возможность существования геомагнитных возмущений, последующих за свершившимися землетрясениями (далее ЗТ), у геофизиков сомнений не вызывает [Elean, 1965; Голиков и др., 1985; Park et al., 1993; Surkov and Pilipenko, 1997; Сурков, 2000; Гохберг и Шалимов, 2008; Surkov and Hayakawa, 2014]. По-видимому, впервые реакция геомагнитного поля на свершившиеся ЗТ была выявлена в 1964 г., например, [Гульельми, 2007]. При этом было обнаружено колебание магнитного поля с периодом около 20 с на расстоянии в 4600 км от эпицентра ЗТ на Аляске (США), наблюдавшееся 24 марта 1964 г.

Геомагнитные возмущения в диапазонах $Pc3$ и $Pc5$, сгенерированные после ЗТ на Суматре 26 декабря 2004 г. ($M \approx 9.3$), унесшего жизни 228 тыс. человек, описаны в работе [Iyemeri et al., 2005]. Колебания $Pc3$ с $T \approx 30$ с авторы связывают с распространением магнитозвуковой волны и колебанием магнитной силовой линии. Колебания $Pc5$ с периодом 3.6 мин, по мнению авторов [Iyemeri et al., 2005], обусловлены динамо-эффектом в нижней ионосфере, вызванным воздействием акустического импульса от ЗТ.

Геомагнитные возмущения, возбуждаемые сильными ЗТ, также обсуждаются в работах [Голиков и др., 1985; Hattori, 2004; Molchanov and Hayakawa, 2008; Hattori, 2013].

По понятным причинам геомагнитным эффектам свершившихся ЗТ уделяется намного меньше внимания, чем эффектам геомагнитных предвестников ЗТ. Между тем, и первые представляют значительный интерес, так как их изучение позволяет лучше понять взаимодействие подсистем, уточнить механизмы и энергетику взаимодействия, дальность распространения возмущений от ЗТ и т.п.

Целью настоящей работы является описание результатов поиска возможной реакции геомагнитного поля в диапазоне периодов 1–1000 с на готовящееся и свершившееся японское ЗТ от 11 марта 2011 г. Данное ЗТ выбрано из большой совокупности других ЗТ по следующим причинам. Во-первых, оно вошло в перечень наиболее сильных и разрушительных, его магнитуда M_w составляла 9.0, размер очага — около 400 км, глубина — около 24 км. Основному толчку, зарегистрированному в 05:46:24 UT, сопутствовало несколько форшоков с $M_w > 6.0$, а также 60 афтершоков с такой же магнитудой и три афтершока с $M_w > 7.0$ (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011>). Во-вторых, эпицентр ЗТ находился на расстоянии от Магнитной обсерватории $R \approx 7830$ км, что позволяет оценить возможность наблюдения реакции геомагнитного поля на столь удаленные ЗТ. Дело в том, что большинство авторов описывают геомагнитные эффекты на сравнительно небольших (порядка сотен километров) расстояниях, где их обнаружить легче. В-третьих, ЗТ сопровождалось существенной магнитной активностью. Поэтому представляет интерес разработка методики выделения возможных геомагнитных эффектов ЗТ на фоне геомагнитных эффектов иного, и в первую очередь, космического происхождения.

2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

2.1. Магнитометр-флюксометр

Основой магнитометрического комплекса, расположенного в Харьковской области, с. Граково, Украина (географические координаты: 49.65° N., 36.9° E), является индуктивный магни-

тометр-флюксметр ИМ-II разработки ОКБ Института физики Земли (ИФЗ РАН). Он обладает высокой чувствительностью (0.5–500 пТ в диапазоне периодов 1–1000 с соответственно) и достаточно широкой полосой исследуемых частот (от 0.001 до 1 Гц). Магнитометр ИМ-II подключен к специализированному микроконтроллерному регистратору, который производит оцифровку и предварительную фильтрацию на интервалах 0.5 с магнитометрических сигналов, а также сохранение отфильтрованных отсчетов и времени их получения в USB флэш-памяти. Информация о текущих дате и времени, получаемая от входящего в состав комплекса приемника GPS сигналов BR-304, используется для ежесуточной коррекции собственных энергонезависимых (имеющих независимое батарейное питание) часов микроконтроллерного регистратора. Благодаря этому погрешность временной привязки магнитометрических данных не превышает нескольких десятых долей секунды.

С помощью указанного магнитометр-флюксметра ведутся непрерывные наблюдения за вариациями уровня горизонтальных H - и D -компонент магнитного поля Земли.

2.2. Системный спектральный анализ

Для детального исследования квазипериодических процессов использовался системный спектральный анализ временных вариаций уровня H - и D -компонент геомагнитного поля [Черногор, 2008]. Он основан на одновременном применении оконного преобразования Фурье (ОПФ), адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразования (ВП). В последнем использовался материнский вейвлет в виде функции Морле, например, [Черногор, 2008]. Как известно, АПФ обладает лучшей разрешающей способностью по частоте (периоду), чем ОПФ. В свою очередь, ОПФ имеет лучшее разрешение по времени, чем АПФ. Важно, что АПФ имеет неизменные относительные (нормированное на длительность “окна”) разрешения по времени и периоду при изменении значения относительного периода. В то же время для ОПФ они изменяются примерно на порядок. ВП позволяет “уравнять шансы” составляющих с различными частотами (периодами). По этим причинам совместное применение ОПФ, АПФ и ВП позволяет более детально исследовать частотно-временную (периодно-временную) структуру различных физических процессов. По настоятельной рекомендации рецензента далее приводятся лишь результаты АПФ.

Системный спектральный анализ проводился в диапазоне периодов 1–10, 10–100 и 100–1000 с. В данной работе приведены результаты анализа для периодов 100–1000 с, где ожидалось проявление УНЧ предвестников ЗТ.

Таблица 1. Индексы геомагнитной активности

Дата	Kp	ΣKp	ap	Ap
01.03.2011	3– 2+ 3– 4– 4 5+ 5 4	30–	12 9 12 22 27 56 48 27	27
02.03.2011	4+ 4– 3– 2 3+ 4 3+ 3–	26	32 22 12 7 18 27 18 12	18
03.03.2011	3– 3 4– 2+ 3 4– 3 4–	25	12 15 22 9 15 22 15 22	16
04.03.2011	2– 3– 3– 3– 3– 3 3+ 3	22–	6 12 12 12 12 15 18 15	13
05.03.2011	1+ 2+ 1– 1+ 2– 1+ 2– 2	12+	5 9 3 5 6 5 6 7	6
06.03.2011	0+ 1+ 0+ 0+ 2+ 2 2– 3	11+	2 5 2 2 9 7 6 15	6
07.03.2011	2 2 1 2– 2+ 2– 4– 3	17+	7 7 4 6 9 6 22 15	10
08.03.2011	2 2– 2– 1– 1 1 1 1+	10+	7 6 6 3 4 4 4 5	5
09.03.2011	2 1– 1+ 1– 1 1– 1+ 2–	9+	7 3 5 3 4 3 5 6	4
10.03.2011	2 2+ 4+ 4– 3– 2 4 5–	26–	7 9 32 22 12 7 27 39	19
11.03.2011	5 5+ 4+ 2 2– 4+ 5 6–	33+	48 56 32 7 6 32 48 67	37
12.03.2011	5– 3– 3– 2– 1+ 1 4– 4–	21+	39 12 12 6 5 4 22 22	15
13.03.2011	1 0+ 0+ 2+ 2– 3+ 3 1	13	4 2 2 9 6 18 15 4	8

3. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

При поиске возможной реакции геомагнитного поля на готовящееся или свершившееся ЗТ, прежде всего, следует обратить внимание на магнитную активность. Эта активность контролировалась при помощи трехчасовых индексов ap и Kp , часовых индексов Dst и суточных индексов Ap и ΣKp (табл. 1 и 2).

Сутки с 1 по 4 марта 2011 г. были магнитовозмущенными: индексы $\Sigma Kp \approx 22–30$, $Ap = 13–27$ и $Dst \approx (-8)–(+20)$ нТл.

С 5 по 9 марта 2011 г. магнитное поле было более спокойным: $\Sigma Kp \approx 9–17$, $Ap = 4–10$ и $Dst \approx (-27)–(+2)$ нТл. 10 марта возмущенность геомагнитного поля возросла и это продолжалось до 12 марта 2011 г. При этом $\Sigma Kp \approx 21–33$, $Ap = 15–37$ и $Dst \approx -(11–83)$ нТл. Такая возмущенность сильно затруднила поиск возможных кратковременных магнитных предвестников ЗТ, а также реакции геомагнитного поля на свершившееся сейсмическое событие. С другой стороны, не исключено,

Таблица 2. Данные о Dst -индексе

Дата	Часы							
	16	17	13	20	–31	–49	–58	–58
01.03.2011	17	16	12	3	–55	–45	–59	–56
	16	19	16	–20	–88	–57	–64	–54
02.03.2011	–57	–36	–43	–33	–27	–26	–35	–36
	–45	–40	–40	–30	–25	–29	–35	–34
	–37	–43	–36	–30	–23	–33	–34	–32
03.03.2011	–28	–19	–19	–18	–18	–18	–18	–24
	–23	–15	–19	–17	–20	–15	–29	–20
	–17	–17	–25	–16	–21	–21	–29	–19
04.03.2011	–16	–14	–20	–14	–26	–18	–27	–25
	–14	–15	–21	–19	–19	–21	–26	–25
	–14	–17	–19	–25	–17	–20	–27	–22
05.03.2011	–21	–21	–19	–18	–17	–9	–12	–9
	–23	–22	–16	–17	–15	–8	–10	–8
	–23	–22	–17	–17	–11	–13	–10	–7
06.03.2011	–5	0	–1	–4	–7	–10	–3	–2
	–5	2	–1	–5	–6	–5	–3	–9
	–4	0	–4	–5	–7	–2	–1	–9
07.03.2011	–7	–5	–4	–4	–8	–9	–17	–20
	–1	–7	–5	–6	–11	–11	–20	–22
	–2	–6	–2	–10	–11	–14	–24	–27
08.03.2011	–24	–22	–20	–20	–20	–20	–15	–13
	–21	–21	–21	–20	–20	–17	–14	–14
	–23	–21	–22	–19	–22	–16	–14	–13
09.03.2011	–14	–17	–12	–6	–7	–10	–9	–4
	–16	–15	–11	–8	–9	–8	–8	–3
	–17	–12	–10	–5	–9	–8	–5	–3
10.03.2011	–11	–15	–19	–36	–39	–33	–37	–62
	–11	–17	–25	–38	–42	–36	–41	–55
	–13	–20	–36	–35	–37	–38	–55	–50
11.03.2011	–50	–69	–80	–72	–58	–42	–53	–64
	–59	–77	–78	–67	–52	–44	–47	–59
	–63	–83	–74	–62	–48	–50	–52	–60
12.03.2011	–58	–43	–45	–40	–40	–26	–21	–32
	–53	–43	–44	–37	–35	–22	–25	–27
	–47	–45	–45	–37	–30	–21	–28	–20
13.03.2011	–21	–22	–18	–13	–12	–9	–14	–19
	–23	–20	–15	–12	–12	–6	–22	–18
	–24	–18	–14	–14	–12	–12	–24	–17

что именно повышенная геомагнитная активность могла спровоцировать японское ЗТ. Связь солнечной активности и, в частности, магнитных бурь с сейсмичностью уже давно обсуждается в литературе, например, [Сытинский, 1987].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В данной работе в качестве примера обсуждается японское ЗТ (событие Тохоку-Оки).

Главный толчок магнитудой $M_w \approx 9.0$ наблюдался 11 марта 2011 г. в 05:46:24 (здесь и далее UT). Координаты эпицентра – $38^\circ 18' N$, $142^\circ 24' E$. Глубина гипоцентра – 24.4 км, длина разлома – 380–400 км. Главный толчок сопровождался несколькими сильными форшоками и большим количеством (более 60) афтершоков.

Магнитный предвестник этого ЗТ описан в работе [Schekotov et al., 2013a, 2013b], а ионосферные эффекты этого ЗТ – в многочисленных работах, например, [Гохберг и др., 2011; Куницын и др., 2011; Перевалова и др., 2012; Дубров и Смирнов, 2013].

Для поиска магнитного предвестника ЗТ благоприятными оказались измерения с 5 марта по 9 марта 2011 г., когда состояние космической погоды было спокойным. В качестве примера приведем результаты спектрального анализа для 8 и 9 марта 2011 г. (рис. 1, 2). Из рисунка 1 видно, что 8 марта 2011 г. всплески уровня H -компоненты геомагнитного поля на 0.5–1 нТл, точнее цуги колебаний, имели место в интервалах времени 01:40–02:15, 03:50–06:45, 09:00–09:45, 09:55–12:25, 14:45–15:30 и 16:10–17:50 UT. Для D -компоненты увеличения уровня на такую же величину наблюдались в следующих интервалах времени: 00:10–02:00, 03:00–04:30, 06:30–08:00, 10:00–13:30, 16:00–17:00, 18:00–19:30 и 20:10–22:00 UT.

Из рисунка 2 можно видеть, что 9 марта 2011 г. всплески уровня H -компоненты геомагнитного поля на 0.5–1 нТл отмечались в таких интервалах времени: 06:25–08:10, 08:35–09:20, 10:50–12:40, 13:45–15:45, 18:00–19:25, 20:50–22:00 и 22:20–23:40 UT. Заметный рост уровня D -компоненты на 0.5–1 нТл наблюдался в интервалах времени 02:10–03:20, 05:40–07:10, 09:50–10:40, 12:30–13:30, 17:50–18:50, 21:15–22:15 и 23:00–24:00 UT.

Увеличение амплитуды колебаний геомагнитного поля с периодом 600–900 с на 0.5–1.0 нТл после главного удара имело место в интервалах времени 06:45–07:25 и 05:56–06:30; 06:50–07:10 UT для H - и D -компонент соответственно (рис. 3). Заметим, что при этом $Kp = 5+$; $ap = 32$; $AE = 638$ –701 нТл. Примерно такое же увеличение амплитуд с таким же периодом имело место в интервалах времени 08:30–09:15; 10:40–11:15; 11:45–12:15; 13:15–13:45; 14:30–15:30 и 08:50–09:30; 10:25–10:50; 11:15–12:15; 12:40–13:35; 15:00–15:50 UT для H - и D -компонент соответственно. Важно, что при этом возмущенность геомагнитного поля была минимальной: $Kp = 2, 2-, 1$; $AE = 586$ –185 нТл.

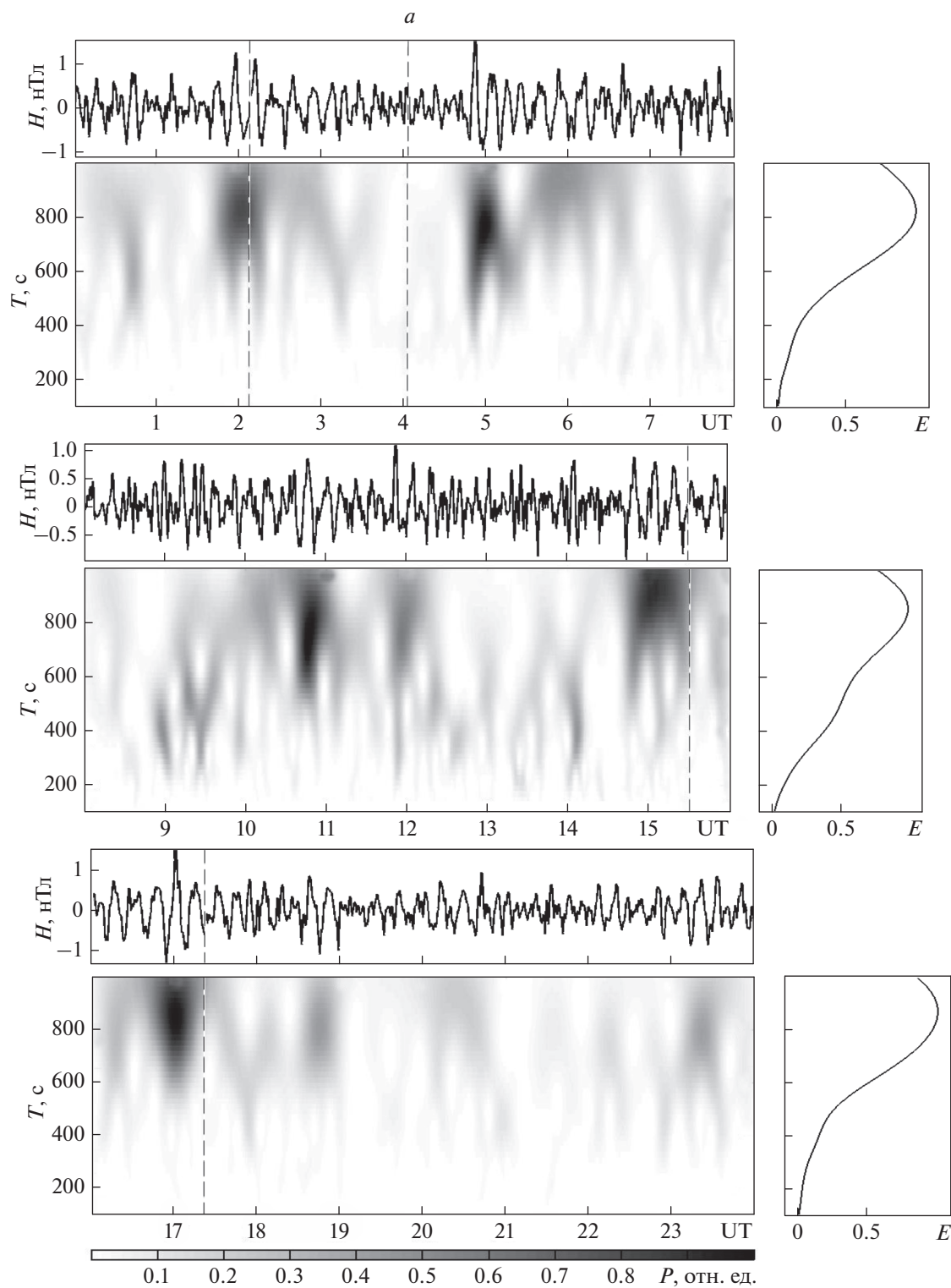


Рис. 1. Временные вариации уровней H - и D -компонент геомагнитного поля 8 марта 2011 г., соответствующие им спектры, полученные при помощи АПФ (левая панель), и энергограммы (распределение средней энергии колебаний по периодам) в диапазоне периодов 100–1000 с. Штриховые линии — моменты восхода Солнца на высоте 300 км и на уровне Земли в месте расположения обсерватории.

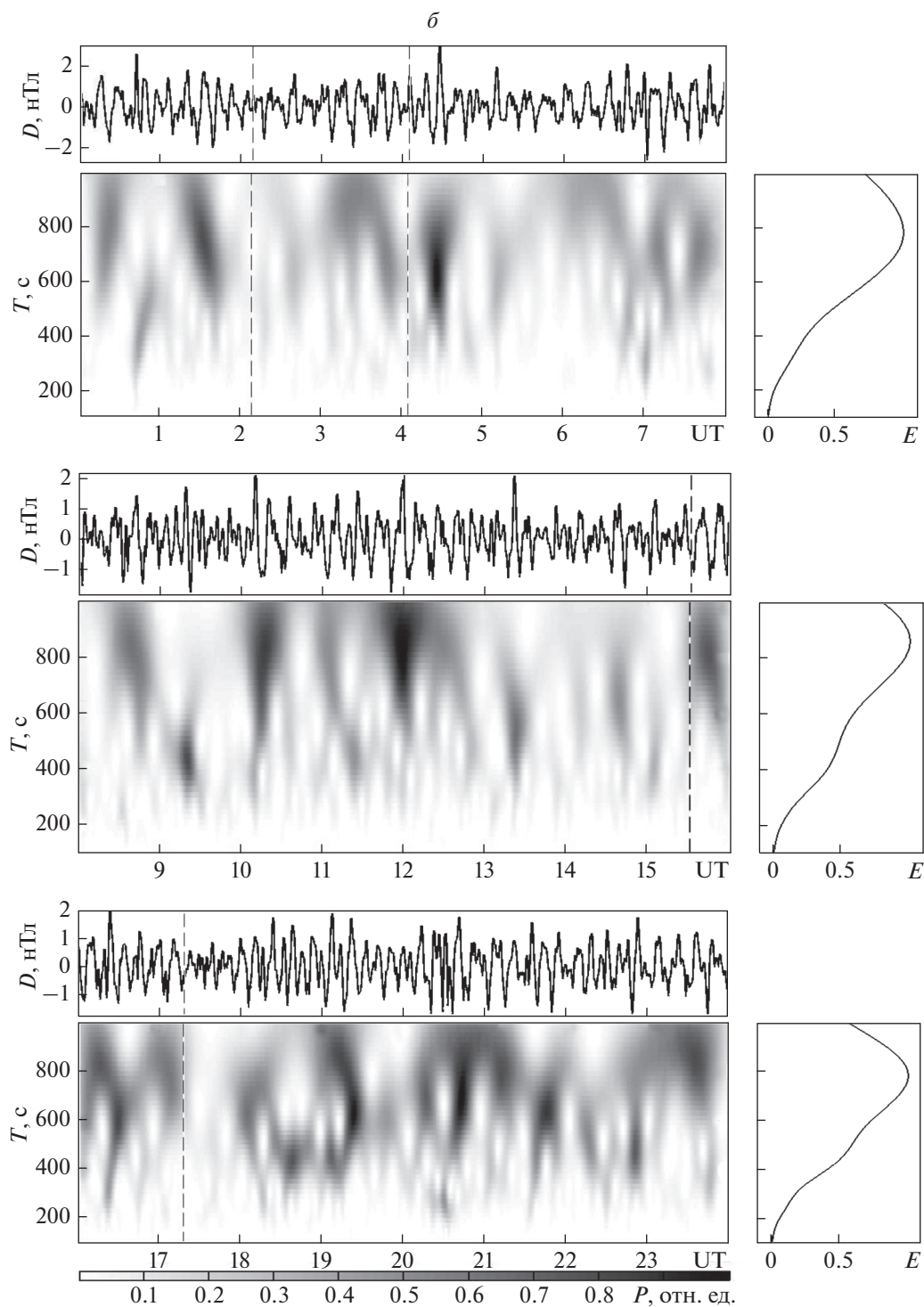


Рис. 1. Окончание.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Большинство всплесков амплитуд обеих компонент магнитного поля 8 и 9 марта 2011 г. наблюдались как в утреннее, так и в вечернее время. Скорее всего, они вызваны движением солнечного терминатора в месте наблюдения и в магнито-

сопряженной области, который генерирует подобные цуги колебаний примерно с такими же параметрами [Черногор, 2012]. Остальные увеличения уровня магнитного поля 8 марта 2011 г. выражены слабо и вряд ли могут рассматриваться как предвестник японского 3Т. Кроме того, они

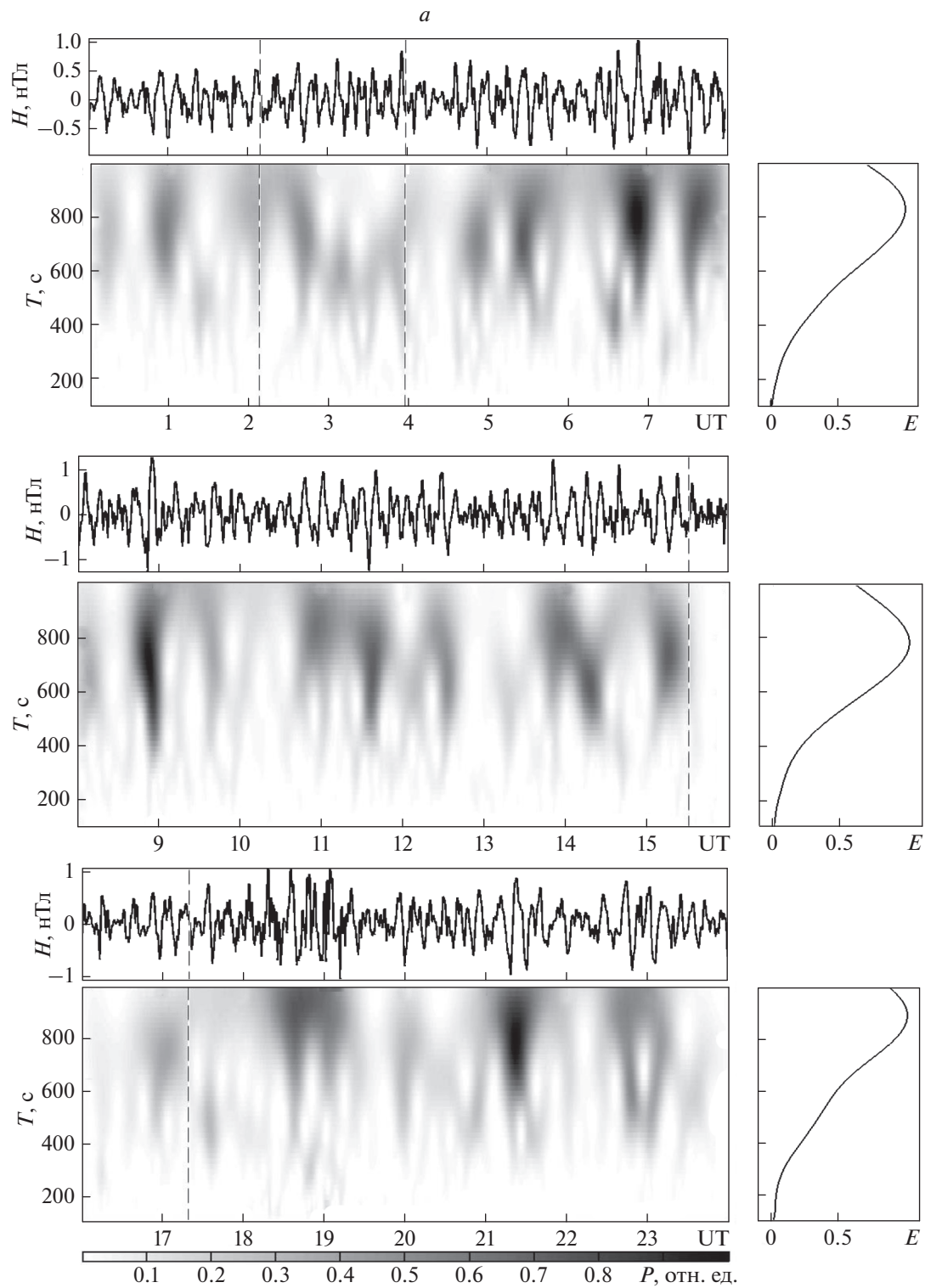


Рис. 2. То же, что на рис. 1 для 9 марта 2011 г.

могут быть вызваны другими источниками возмущений.

Всплески уровня магнитного поля 9 марта 2011 г. в интервалах времени 06:00–08:00 и 21:00–22:00

теоретически могут рассматриваться как магнитный предвестник ЗТ. Однако, строго обосновать это невозможно. Сильная магнитная возмущенность ($Kp_{\max} = 5-$, $\Sigma Kp = 26-$, $ap_{\max} = 39$, $\Sigma ap = 172$,

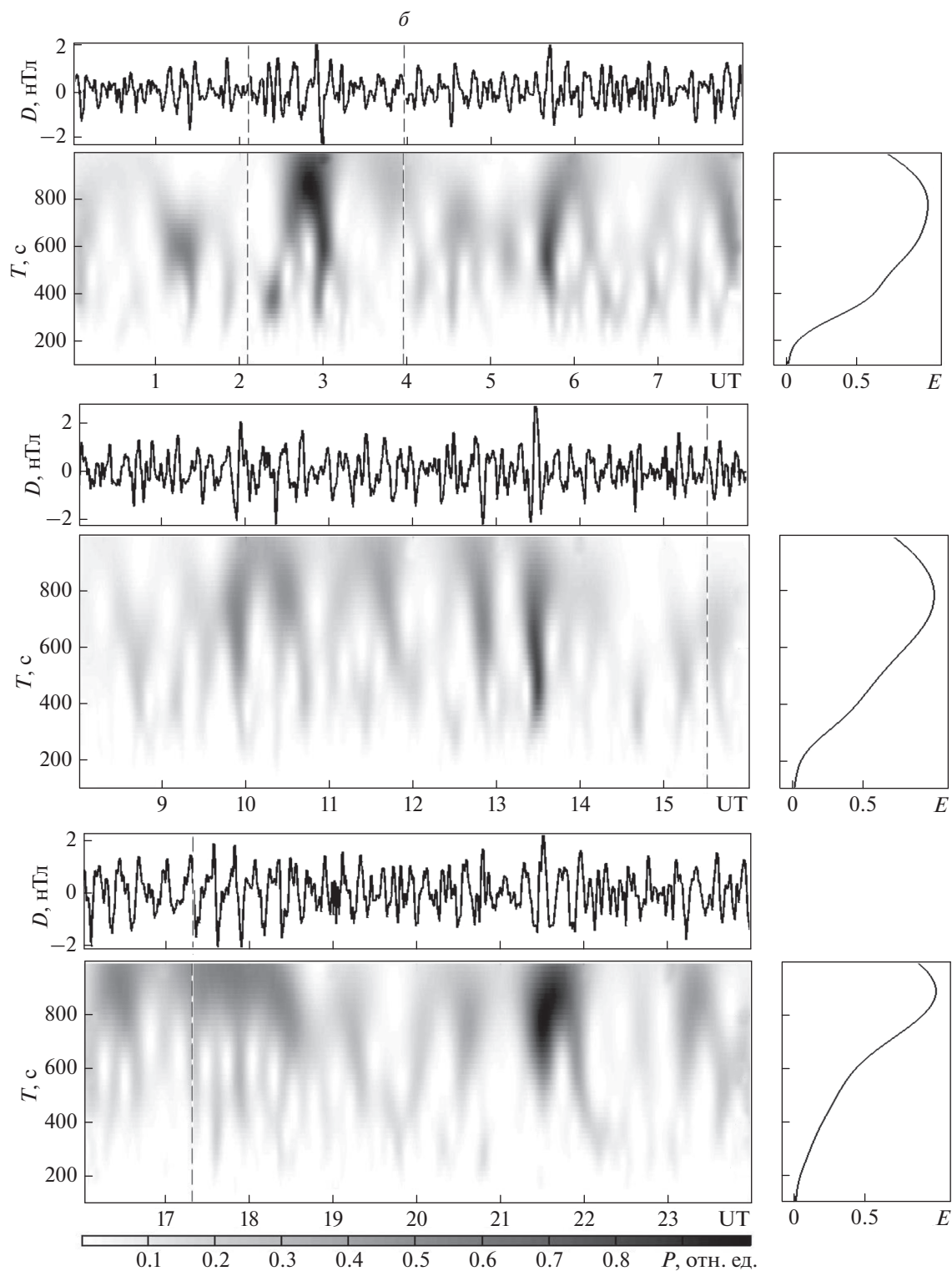


Рис. 2. Окончание.

$AE_{\max} = 1076$ нТл, в среднем AE -индекс составлял 465 нТл) 10 марта 2011 г. не позволила выделить возможный магнитный предвестник.

Таким образом, измерения в одной обсерватории в принципе не позволяют однозначно идентифицировать магнитный предвестник ЗТ. Для

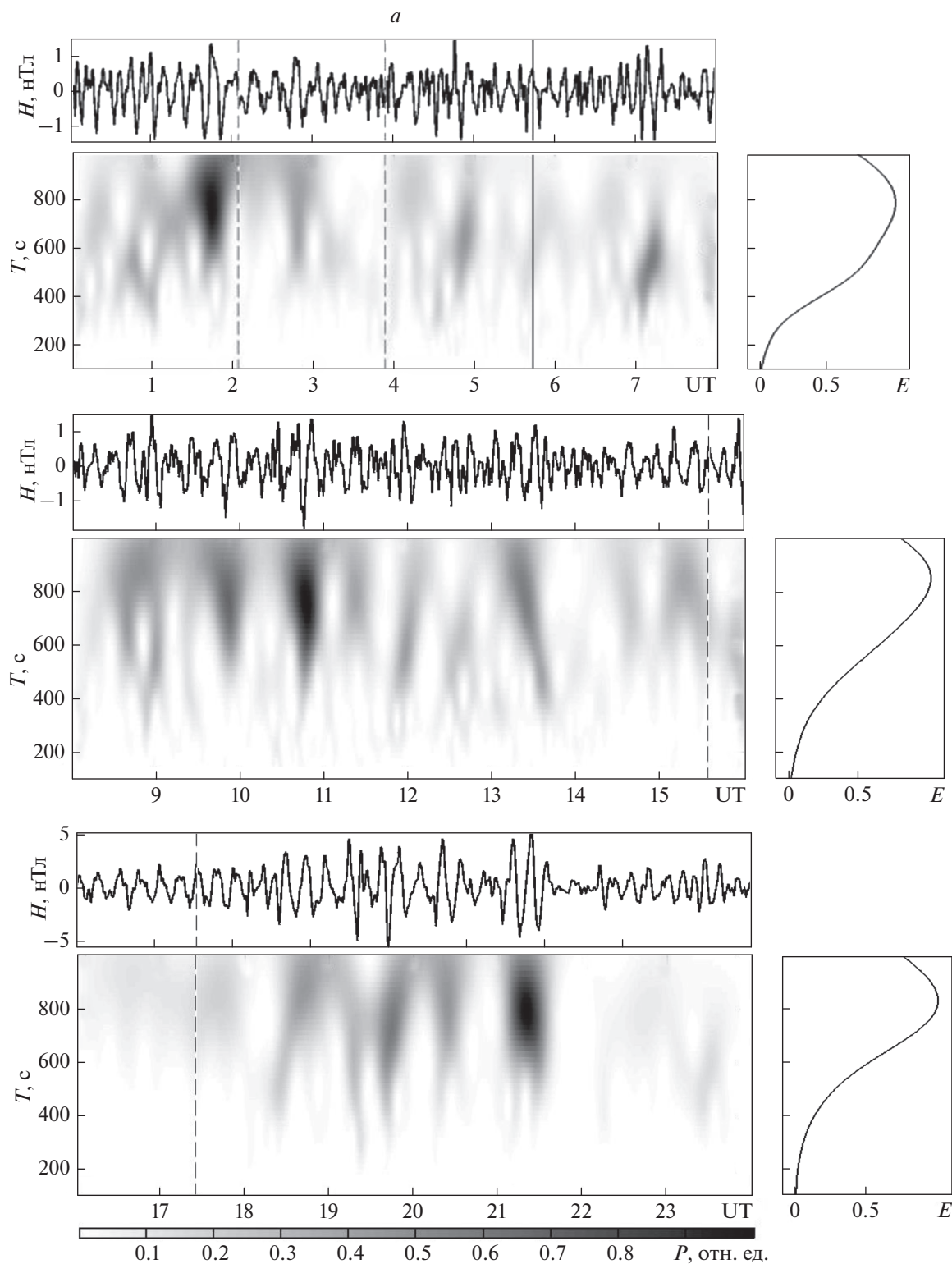


Рис. 3. То же, что на рис. 1 для 11 марта 2011 г. Сплошная вертикальная линия — момент главного сейсмического события.

его обнаружения потребуется сеть разнесенных в пространстве магнитометров. В этом случае время запаздывания магнитного предвестника, име-

ющего волновую природу, будет увеличиваться по мере увеличения расстояния между очагом ЗТ и обсерваторией. Кроме того, измерения на сети

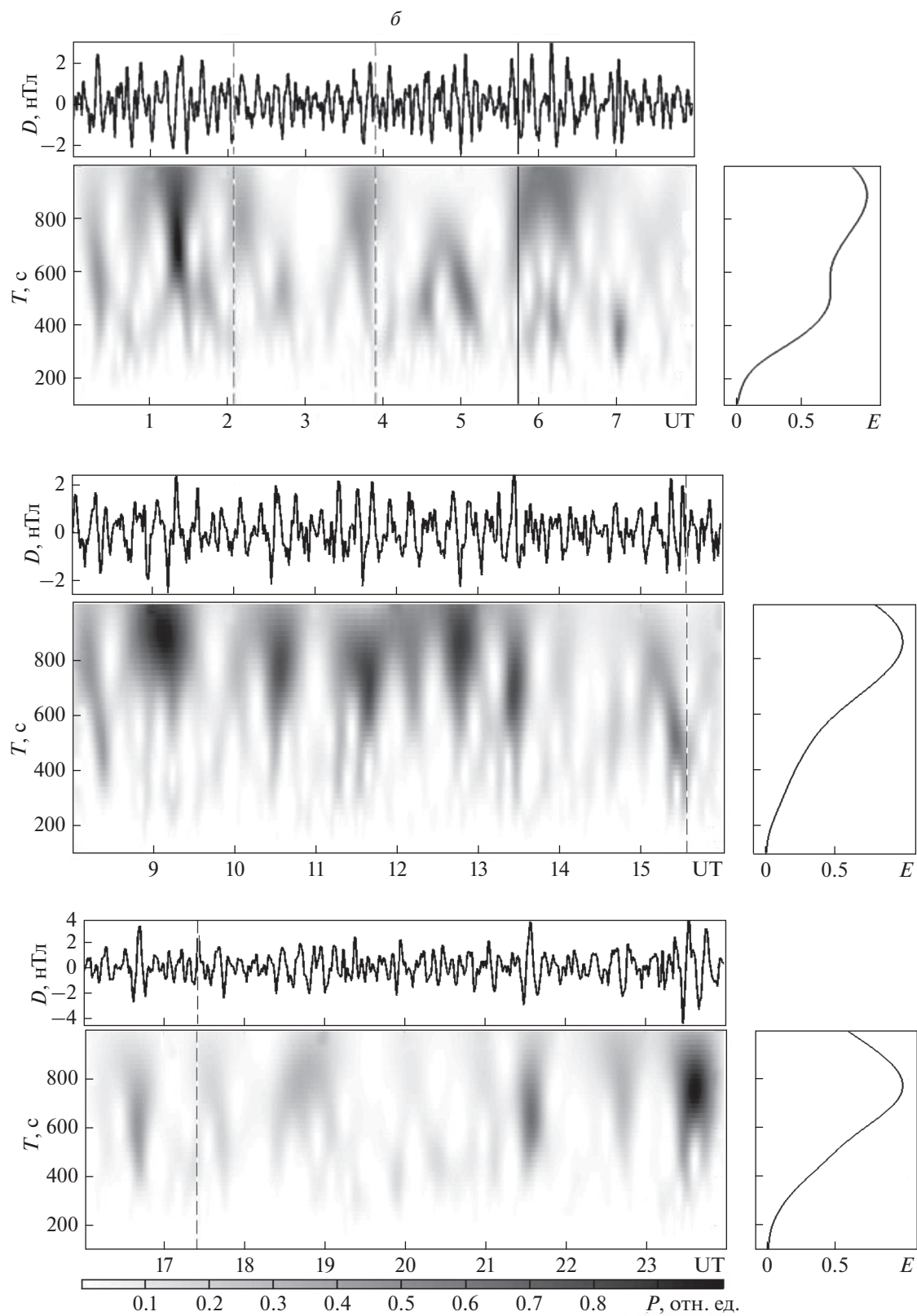


Рис. 3. Окончание.

магнитометров позволят отфильтровать геомагнитные вариации другой природы.

Обсудим далее механизмы генерации квазипериодических вариаций геомагнитного поля, связанных с ЗТ. Для свершившихся ЗТ механизмы генерации детально описаны в литературе, например, [Eleman, 1965; Голиков и др., 1985; Park et al., 1993; Surkov and Pilipenko, 1997; Сурков, 2000; Гохберг и Шалимов, 2008; Surkov and Hayakawa, 2014]. Эти механизмы связаны с генерацией сейсмических волн в литосфере, а также инфразвуковых и гравитационных волн в атмосфере. Движение нейтральной компоненты в атмосфере навязывает движение ионосферной плазме. В результате квазипериодических вариаций концентрации электронов N в ионосфере возникают колебания плотности ионосферных токов и, в конечном итоге, осцилляции уровня геомагнитного поля.

Перейдем к обсуждению возможных магнитных эффектов, последовавших за японским ЗТ. Первое увеличение уровней H - и D -компонент имело место примерно через 59 и 64 мин соответственно после главного толчка. 11 марта 2011 г. примерно с 09:00 и до 15:00 UT значения индекса Kp не превышали 2. Возникшие в этом интервале времени увеличения уровня обеих компонент геомагнитного поля могли быть вызваны Великим японским ЗТ. Предполагаемое время запаздывания реакции изменялось от ~170–180 до ~520–550 мин. Такой значительный разброс мог быть связан с распространением волновых возмущений в атмосфере по различным траекториям.

Если перечисленные выше времена запаздывания связаны с реакцией геомагнитного поля на главный толчок, то при $R \approx 7830$ км имеем характерные скорости 2.2 км/с и 250–800 м/с для H -компоненты и 2.0 км/с и 240–710 м/с для D -компоненты. Большая скорость соответствует сейсмической волне, а меньшая – акустико-гравитационной волне [Гохберг и др., 2011; Куницын и др., 2011; Перевалова и др., 2012]. К сожалению, по измерениям в одном пункте убедительно нельзя доказать, что описанные вариации были вызваны ЗТ. В пользу того, что эти вариации могли быть связаны с ЗТ, свидетельствуют разумные значения оцененных скоростей распространения возмущений и надежно установленный ранее рядом авторов их механизм генерации.

Для подтверждения возможной реакции геомагнитного поля на свершившееся ЗТ нами обработаны регистрации уровня X - и Y -компонент геомагнитного поля, выполнены на восьми обсерваториях (табл. 3). Исходные данные представлены на сайте INTERMAGNET [www.intermag.net.org]. Для выявления волновых возмущений геомагнитного поля производилась полосовая фильтрация в диапазоне периодов 2–120 мин. Пример почти синхронных для всех станций вариаций уровня X -

Таблица 3. Сведения о магнитометрических станциях

Наименование станции	Географические координаты	R , км
Kakioka (KAK)	36.23° N, 140.18° E	301
Memambetsu (MMB)	43.91° N, 144.19° E	641
Kanoya (KNY)	31.42° N, 130.88° E	1295
Changchun (CNH)	44.08° N, 124.86° E	1593
Beijing Ming Tombs (BMT)	40.30° N, 116.20° E	2252
Novosibirsk (NVS)	54.85° N, 83.23° E	4710
Borok (BOX)	58.07° N, 38.23° E	7208
Kiev (KIV)	50.72° N, 30.30° E	8106

компоненты геомагнитного поля показан на рис. 4. Из этого рисунка видно, что примерно в 06:03–06:08 UT, т.е. через 16.5–21.5 мин для $R \approx 640$ –7200 км соответственно после ЗТ в интервале времени 06:03–14:30 UT существенно изменился характер вариаций уровня геомагнитного поля: появились его квазипериодические колебания с амплитудой 4–8 нТл. Первой появилась фаза “сжатия” ($\Delta X, \Delta Y > 0$), которая сменилась фазой “разрежения” ($\Delta X, \Delta Y < 0$). Затем имели место квазипериодические колебания. Для ближайшей обсерватории с $R \approx 640$ км имеем время запаздывания реакции $\Delta t \approx 16.5$ мин. При высоте токовой струи $z \approx 100$ –130 км вертикальная составляющая скорости переноса возмущения $v_v \approx 0.10$ –0.13 км/с. Такую скорость в вертикальном направлении имеют гравитационные волны. Горизонтальная составляющая этих волн $v_h \approx 0.3$ –0.4 км/с. В пользу гравитационных волн свидетельствует и наблюдаемый период – от 25 до 100–120 мин.

Важно, что при $R \approx 7200$ км $\Delta t \approx 21.5$ мин. Тогда расстояние примерно в 6600 км возмущение магнитного поля преодолевает за 5 мин. При этом скорость магнитного возмущения составляет около 22 км/с. Такую скорость в ионосфере имеют медленные МГД волны [Сорокин и Федорович, 1982]. Эти волны отличаются от быстрых МГД волн тем, что их скорость определяется не концентрацией частиц плазмы, а концентрацией нейтралов. О том, что квазипериодические возмущения магнитного поля вызваны ЗТ, свидетельствует не только увеличение времени запаздывания реакции при увеличении расстояния, но и тенденция к уменьшению амплитуды квазипериодических возмущений при увеличении R (рис. 4).

Пример результатов спектрального анализа уровня X -компоненты геомагнитного поля для станции MMB приведен на рис. 5, из которого видно, что в спектре вариаций преобладали составляющие с периодами около 25, 60 и 100–120 мин. Важно, что значения периодов значительно больше периодов геомагнитных пульсаций $Pc5$ космиче-

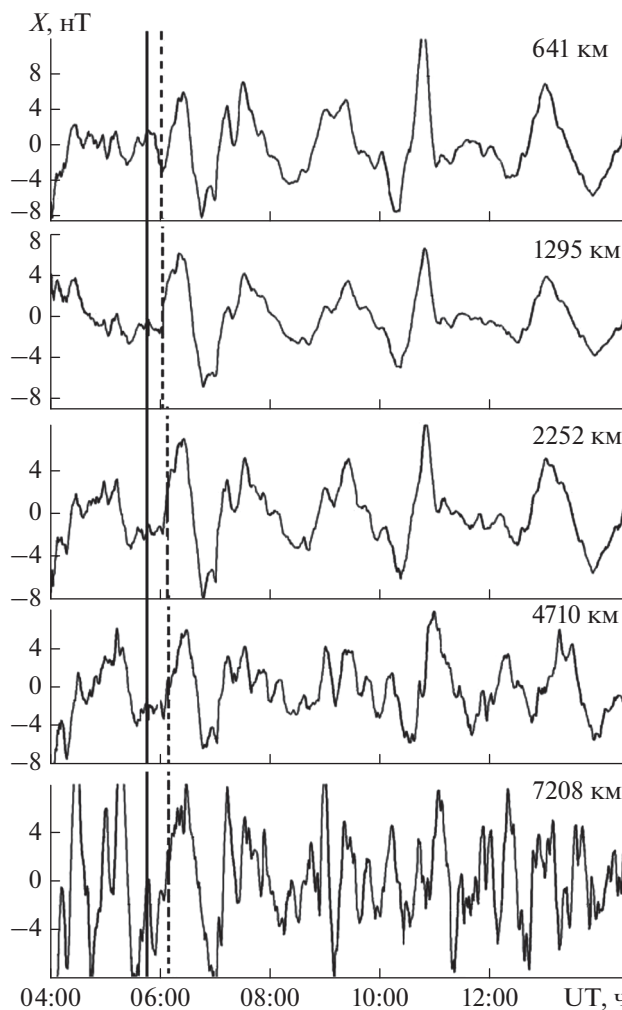


Рис. 4. Временная зависимость уровня X -компоненты на станциях MMB, KNY, BMT, NVS и BOX в полосе периодов 2–120 мин. Вертикальная линия — момент ЗТ, а штриховой линией — моменты начала реакции на ЗТ.

ского происхождения, для которых период составляет около 10 мин. Добавим, что указанные выше периоды колебаний не наблюдались ни до 06:00 UT, ни после 14:30 11 марта 2011 г.

Представляется разумным следующий механизм генерации наблюдаемых почти синхронных вариаций уровня X -компоненты геомагнитного поля (для Y -компоненты подобные вариации выражены слабее). Вспучивание земной поверхности при ЗТ привело к фазам “сжатия-разрежения” в атмосфере и генерации АГВ над областью ЗТ. АГВ промодулировали концентрацию электронов, плотность ионосферного тока в динамо-области атмосферы и вызвало квазипериодические вариации геомагнитного поля. Эти возмущения затем со скоростью медленных МГД-волн распространились вдоль ионосферы. Скорость медленных МГД-волн в ионосфере составляет $\sim 1\text{--}100$ км/с. Далее при скорости 22 км/с и максимальном расстоянии до обсерватории в 8000 км величина вре-

менного сдвига составила около 6 мин. Такой сдвиг при временном разрешении в 1 мин удастся зарегистрировать.

Таким образом, приведенные выше соображения свидетельствуют в пользу того, что обнаруженные квазипериодические вариации геомагнитного поля, следовавшие за японским ЗТ, могли быть вызваны сейсмическим событием.

Отличием долгопериодических (20–120 мин) вариаций геомагнитного поля от вариаций концентрации электронов, зарегистрированных при помощи системы GPS-приемников, является то, что первые распространяются со скоростью медленных МГД-волн, а вторые — существенно медленнее, со скоростью сейсмических волн, а также АГВ. В то же время магнитометр-флюксметр реагирует на достаточно короткопериодические колебания, связанные как с сейсмическими волнами, так и с АГВ.

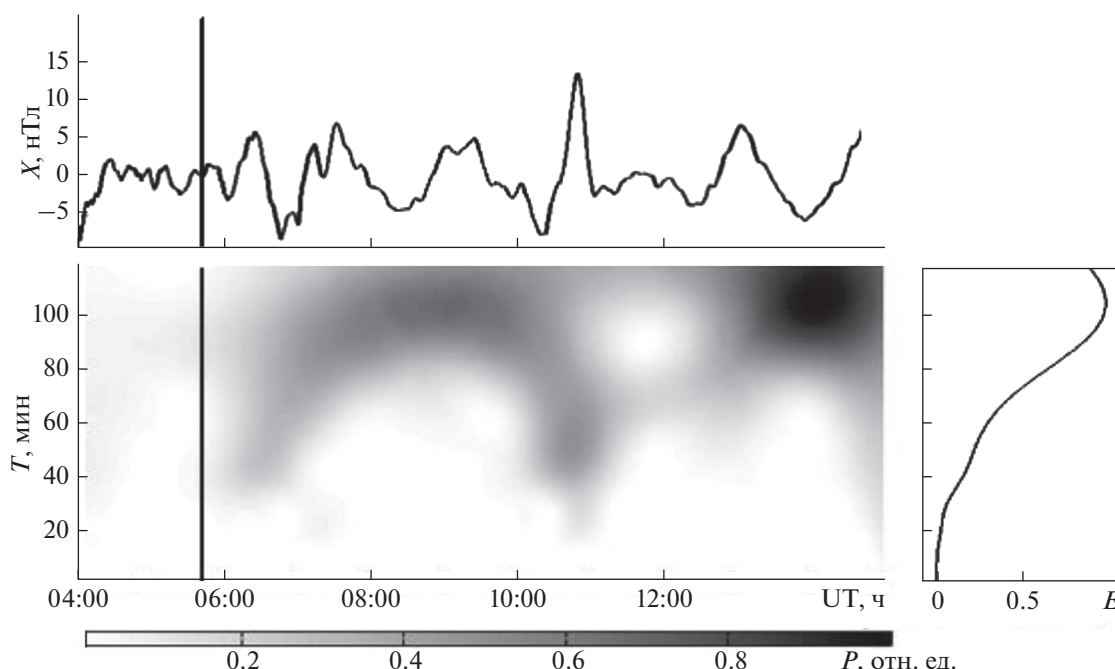


Рис. 5. Результаты полосовой фильтрации в полосе периодов 2–120 мин (верхняя панель) и спектрального анализа с шагом дискретизации 1 мин (АПФ, левая панель, справа — энергограмма) данных для временных вариаций X -компоненты геомагнитного поля 11 марта 2011 г. в интервале 04:00–15:00 UT станции ММВ. Вертикальной линией показан момент ЗТ.

6. ВЫВОДЫ

1. Измерения уровня флуктуаций геомагнитного поля, в принципе, могут использоваться в качестве инструмента для поиска магнитных предвестников ЗТ и реакции геомагнитного поля на свершившиеся ЗТ. При этом, однако, требуется очень тщательный анализ вариаций геомагнитного поля, вызванных другими, и в первую очередь, космическими источниками.

2. Обнаруженные цуги колебаний геомагнитного поля с периодом 400–900 с, следовавшие за ЗТ, могли быть вызваны модуляцией концентрации электронов под действием сейсмических и акустико-гравитационных волн. Первым соответствуют скорости 2.2–3.5 км/с, вторым — 250–800 м/с.

3. Амплитуда наблюдавшихся цугов колебаний достигала 1.5–2.5 нТл, а длительность — 60–80 мин.

4. Обнаружены длиннопериодические (20, 60 и 100–120 мин) почти синхронные вариации уровня геомагнитного поля с амплитудой 4–8 нТл, следовавшие за ЗТ. Время запаздывания переднего фронта этих возмущений увеличивалось при увеличении расстояния между эпицентром и обсерваторией, а их амплитуда при этом убывала. Скорее всего, возмущения геомагнитного поля при этом переносились при помощи медленных МГД-волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земли — ионосфера. К.: Наукова думка. 181 с. 1977.
- Голиков Ю.В., Д'Коста А., Пилипенко В. А. Геомагнитные пульсации, возбуждаемые при сильных землетрясениях // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 25. № 5. С. 824–828. 1985.
- Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир. 532 с. 1978.
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления. М.: Наука. 180 с. 1988.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука. 295 с. 2008.
- Гохберг М.Б., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л., Вейс В.А., Грехова Е.А. Ионосферный отклик на подводное землетрясение в Японии 11.03.2011 г. по наблюдениям со спутников GPS // Геофизические процессы и биосфера. Т. 10. № 1. С. 47–63. 2011.
- Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме. М.: Наука. 139 с. 1979.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука. 208 с. 1983.
- Гульельми А.В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли // УФН. Т. 177. № 12. С. 1250–1276. 2007.
- Дубров М.Н., Смирнов В.М. Взаимосвязанные возмущения земной поверхности, атмосферы и ионосферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 1. С. 53–63. 2013.

- Куницын В.Е., Нестеров И.А., Шалимов С.Л. Мегаземлетрясение в Японии 11 марта 2011 г.: регистрация ионосферных возмущений по данным GPS // Письма в ЖЭТФ. Т. 94. № 8. С. 657–661. 2011.
- Лихтер Я.И., Гульельми А.В., Ерухимов Л.М., Михайлова Г.А. Волновая диагностика приземной плазмы. М.: Наука. 215 с. 1988.
- Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир. 299 с. 1980.
- Перевалова Н.П., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В., Ишин А.Б., Воейкова Е.С., Саньков В.А. Исследование ионосферных возмущений, вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., по данным сети GEONET // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 9. № 3. С. 172–180. 2012.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Л.: Изд-во ЛГУ. Ч. 2. 270 с. 1976.
- Соболев Г.А., Пономарёв А.В. Физика землетрясений и предвестников. М.: Наука. 270 с. 2003.
- Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат. 136 с. 1982.
- Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при взрывах и землетрясениях. М.: МИФИ. 448 с. 2000.
- Сытинский А.Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью. Л.: Гидрометиздат. 99 с. 1987.
- Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 48. № 5. С. 681–702. 2008.
- Черногор Л.Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина. 386 с. 2009.
- Черногор Л.Ф. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие движению солнечного терминатора через магнитосопреженную область // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 17. № 1. С. 57–66. 2012.
- Черногор Л.Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // Радиофизика и электроника. Т. 4 (18). № 3. С. 47–54. 2013.
- Черногор Л.Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: Монография. Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина. 448 с. 2014а.
- Черногор Л.Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 54. № 5. С. 658–669. 2014б.
- Черногор Л.Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 58. № 2. С. 267–280. 2018.
- Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes. Ed. Hayakawa M. Tokyo: Terra Scientific Pub. Comp. 996 p. 1999.
- Chernogor L.F., Blaunstein N. Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group. 542 p. 2013.
- Current research in Earth prediction. Ed. Rikitake T. Dordrecht: D. Reidel Publishing. 510 p. 1981.
- Earthquakes prediction studies: seismo electromagnetic. Ed. Hayakawa M. Tokyo: TERRAPUB. 794 p. 2013.
- Electromagnetic phenomena associated with earthquakes. Ed. Hayakawa M. Trivandrum: Transwold Research Network. 279 p. 2009.
- Eleman F. The response of magnetic instruments to earthquake waves // J. Geomagnetism and Geoelectricity. V. 18. P. 43–72. 1965.
- Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction. Eds. Hayakawa M., Fujinawa Y. Tokyo: Terra Scientific Pub. Comp. 677 p. 1994.
- Hattori K. ULF geomagnetic changes associated with large earthquakes // Terr. Atmos. Ocean Sci. V. 15. P. 329–360. 2004.
- Hattori K. ULF geomagnetic changes with major earthquakes. In: Earthquake prediction studies: Seismo electromagnetic. Ed. Hayakawa M. Tokyo: TERRAPUB. P. 129–152. 2013.
- Hayakawa M., Kawate R., Molchanov O.A., Jumoto K. Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993 // Geophys. Res. Lett. V. 23. № 3. P. 241–243. 1996.
- Iyemeri T., Nose M., Han D., Gao J., Hashizume M., Choosakul 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 // Geophys. Res. Lett. V. 32. L20807. 2005. doi 10.1029/2005GL024083
- Molchanov O.A., Hayakawa M. Seismo-electromagnetics and related phenomena: history and latest results. Tokyo: TERRAPUB. 189 p. 2008.
- Park S.K., Johnson M., Madden J.S., Morgan F.D., Morrison H.F. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: a review of observations and mechanisms // Rev. Geophys. V. 31. P. 117–132. 1993.
- Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization // Science. V. 342. P. 1069–1073. 2013.
- Schekotov A., Fedorov E., Hobara Y., Hayakawa M. ULF magnetic field depression as a possible precursor to the 2011/3.11 Japan earthquake // J. Atmospheric Electricity. V. 33. № 1. С. 41–51. 2013а.
- Schekotov A., Fedorov E., Hobara Y., Hayakawa M. ULF magnetic field depression as a possible precursor to the 2011/3.11 Japan earthquake // Radiophysics and Electronics. Т. 4(18), №1 С. 47–52. 2013б.
- Seismo-electromagnetics: lithosphere – atmosphere – ionosphere coupling. Eds. Hayakawa M., Molchanov O.A. Tokyo: TERRAPUB. 477 p. 2002.
- Silber E.A., Pichon A.L., Brown P.G. Infrasonic detection of a near-Earth object impact over Indonesia on 8 October 2009 // Geophys. Res. Lett. V. 38. P. L12201. 2011. doi 10.1029/2011GL047633
- Surkov V.V., Pilipenko V.A. Magnetic effects due to earthquakes and underground explosions: a review // Annali di geofisica. V. 40. № 2. P. 227–239. 1997.
- Surkov V., Hayakawa M. Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields. Tokyo, Heidelberg New York Dordrecht London: Springer. 486 p. 2014.