

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-09>

УДК 550.385.37: 550.388

ФЛУКТУАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОПРОВОЖДАВШИЕ ЧУЙСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В СЕНТЯБРЕ – ОКТЯБРЕ 2003 г.

Y. Luo, K. P. Гармаш, Л. Ф. Черногор, С. Н. Шульга

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

Актуальность. В настоящее время актуальной проблемой является изучение взаимодействия подсистем в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера. Для выявления прямых и обратных, положительных и отрицательных связей между подсистемами используются источники с большим энерговыделением. В данной работе в качестве такого источника рассматриваются Чуйские землетрясения, магнитуда которых изменялась от 4.5 до 7.3.

Целью настоящей работы является описание результатов поиска возможной реакции геомагнитного поля в диапазоне периодов 1 – 1000 с на готовящиеся и свершившиеся Чуйские землетрясения в сентябре – октябре 2003 г.

Методы и методология. Измерения выполнены с помощью магнитометра-флюксметра, расположенного в Магнитометрической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина. Чувствительность магнитометра составляет 0.5 – 500 пТл для периодов 1 – 1000 с. Обработка результатов измерений производилась в три этапа. Сначала магнитометрические сигналы, зарегистрированные в относительных единицах, с учетом амплитудно-частотной характеристики магнитометра преобразовывались в сигналы, измеряемые в абсолютных единицах. Далее осуществлялась полосовая фильтрация в диапазонах периодов 1 – 10, 10 – 100 и 100 – 1000 с. После этого проводился системный спектральный анализ временных вариаций уровня Н- и D-компонент геомагнитного поля.

Результаты. За 43 и 163 мин до землетрясения с магнитудой 7.3 обнаружены квазипериодические вариации геомагнитного поля, которые могли быть магнитным предвестником землетрясения. Описан механизм такого предвестника. После землетрясений с магнитудами 7.3, 6.7 и 7.0 обнаружены квазипериодические вариации геомагнитного поля. Такие вариации могли быть вызваны переносом возмущений при помощи сейсмических волн, имеющих скорости от 1.9 до 5.3 км/с, а также при помощи акустико-гравитационных волн, распространяющихся со скоростью от 320 до 670 м/с. 1 октября 2003 г. изменение характера вариаций имело место при временах запаздывания от 0 до 5 мин. Если эти вариации связаны с землетрясениями, переносчиком возмущений могли выступать МГД волны.

Выводы. Установлено, что умеренные землетрясения способны приводить к регистрируемым возмущениям в геомагнитном поле на расстояниях ~3500 км от эпицентра сейсмического удара.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: землетрясение, геомагнитное поле, магнитометр-флюксметр, полосовая фильтрация, системный спектральный анализ, квазипериодические возмущения, сейсмические волны, акустико-гравитационные волны

ФЛУКТУАЦІЇ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ, ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ ЧУЙСЬКІ ЗЕМЛЕТРУСИ В ВЕРЕСНІ – ЖОВТНІ 2003 р.

Y. Luo, K. P. Гармаш, Л. Ф. Черногор, С. М. Шульга

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна, 61022, Харків, м. Свободи 4

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

Актуальність. У даний час актуальною проблемою є вивчення взаємодії підсистем в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера. Для виявлення прямих і зворотних, позитивних і негативних зв'язків між підсистемами використовуються джерела з великим енерговиділенням. У даній роботі в якості такого джерела розглядаються Чуйські землетруси, магнітуда яких змінювалася від 4.5 до 7.3.

Метою цієї роботи є опис результатів пошуку можливої реакції геомагнітного поля в діапазоні періодів 1 – 1000 с на Чуйські землетруси, які підготовлювалися або відбулися, у вересні – жовтні 2003 р.

Методи і методологія. Вимірювання виконані за допомогою магнітометра-флюксметра, розташованого в Магнітометричній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна. Чутливість магнітометра складає 0.5 – 500 пТл для періодів 1 – 1000 с. Обробка результатів вимірювань здійснювалася в три етапи. Спочатку магнітометричні сигнали, зареєстровані у відносних одиницях, з урахуванням амплітудно-частотної характеристики магнітометра перетворювалися в сигнали, вимірювані в абсолютних одиницях. Далі здійснювалася смугова фільтрація в діапазонах періодів 1 – 10, 10 – 100 і 100 – 1000 с. Після цього проводився системний спектральний аналіз часових варіацій рівня Н- та D-компонент геомагнітного поля.

Результати. За 43 та 163 хв до землетрусу з магнітудою 7.3 виявлено квазіперіодичні варіації геомагнітного поля, які могли бути магнітним передвісником землетрусу. Описано механізм такого передвісника. Після землетрусів з магнітудами 7.3, 6.7 і 7.0 виявлено квазіперіодичні варіації геомагнітного поля. Такі варіації

могли бути викликані перенесенням збурень за допомогою сейсмічних хвиль, що мають швидкості від 1.9 до 5.3 км/с, а також за допомогою акустико-гравітаційних хвиль, які поширюються зі швидкістю від 320 до 670 м/с. 1 жовтня 2003 р. зміна характеру варіацій мала місце при часах запізнення від 0 до 5 хв. Якщо ці варіації пов'язані з землетрусами, переносником збурень могли виступати МГД хвилі.

Висновки. Установлено, що помірні землетруси здатні призводити до реєструємих збурень у геомагнітному полі на відстанях ~3500 км від епіцентру сейсмічного удару.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: землетрус, геомагнітне поле, магнітометр-флюксометр, смугова фільтрація, системний спектральний аналіз, квазіперіодичні збурення, сейсмічні хвилі, акустико-гравітаційні хвилі

GEOMAGNETIC FIELD FLUCTUATIONS DURING CHUYSK EARTHQUAKES ON SEPTEMBER – OCTOBER, 2003

Y. Luo, K. P. Garmash, L. F. Chernogor, S. M. Shulga

V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Urgency. There is an urgent need to study the interactions in the Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere system. To identify direct and reverse, positive and negative links among the subsystems, sources producing massive releases of energy are commonly used. In this paper, the Chuysk earthquakes whose Richter magnitudes vary from 4.5 to 7.3 are considered as such a source.

The aim of this paper is to present the findings of studying a possible response of the geomagnetic field in the 1 – 1000-s period variations to the preparation and occurrence of the Chuysk earthquakes of September – October 2003.

Techniques and Methodology. The measurements were carried out using the fluxgate magnetometer located at the V. N. Karazin Kharkiv National University Geomagnetic Observatory. The sensitivity of the magnetometer is 0.5 – 500 pT in the 1 – 1000-s period range. The data processing was performed in three stages. First, the signals from the magnetometer, recorded in relative magnetometer units, were converted into absolute units, taking into account the magnetometer frequency response. Second, band-pass filtering was performed in the 1 – 10-s, 10 – 100-s, and 100 – 1000-s period ranges. Third, a system spectral analysis of time variations in the H- and D-components of the geomagnetic field was undertaken.

Results: Forty three minutes and one-hundred-sixty-three minutes prior to the earthquake of Richter magnitude 7.3, quasi-periodic variations of the geomagnetic field were observed. These variations may be an earthquake magnetic precursor, and the mechanism of such a precursor has been described. After the earthquakes of Richter magnitudes 7.3, 6.7, and 7.0, quasi-periodic variations of the geomagnetic field were detected. Such variations may be caused by the perturbation transfer due to seismic waves with speeds in the 1.9 – 5.3-km/s range and owing to atmospheric gravity waves traveling with speeds in the 320- to 670-m/s range. On October 1, 2003, the changes in the character of the variations occurred with time delays of 0 to 5 min. If these variations were associated with earthquakes, the magnetohydrodynamic waves could act as an agent that transferred the disturbances.

Conclusions: The moderate earthquakes are determined to be able to cause geomagnetic field disturbances recordable at distances of about 3,500 km from the epicenter.

KEY WORDS: earthquake, geomagnetic field, fluxgate magnetometer, band-pass filtering, system spectral analysis, quasi-periodic disturbances, seismic wave, atmospheric gravity wave

ВВЕДЕНИЕ

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

Изучению геомагнитных возмущений в системе СМСМИАЗ посвящено большое количество работ (см., например, [1 – 5]). В этих работах обсуждаются в основном возмущения геомагнитного поля, вызванные космическими причинами. Геомагнитные и электромагнитные процессы литосферного происхождения детально описаны в книгах [6 – 16].

Перечислим четыре основных группы источников геомагнитных возмущений:

- космические источники (солнечный ветер, межпланетная среда, падающие космические тела, солнечный терминатор и др.) [1 – 5, 17 – 20];
- атмосферные источники (грозы, погодные фронты, циклоны и др.) (см., например, [21]);
- литосферные (микрорастрескивающиеся породы, флуктуирующее движение в поровой жидкости, разряды статического электричества между разломами и др.) [6 – 16];
- техногенные (мощные взрывы, старты и полеты ракет, мощное радиоизлучение и др.) [10, 16, 19, 22 – 24].

Основным источником геомагнитных возмущений, без сомнения, являются космические источники.

Некосмические источники проявляются значительно реже, чем космические источники. Периоды колебаний и длительность цугов для космических и других источников сопоставимы. Амплитуды обычно существенно меньше для атмосферных, литосферных и техногенных источников, чем для космических источников (от ~10 пТл до ~10 нТл). Это обстоятельство, конечно, усложняет обнаружение и идентификацию источников некосмического происхождения.

Далее подробнее остановимся на геомагнитных возмущениях литосферного происхождения. Такие возмущения обсуждаются в огромном количестве специальной литературы (см., например, [8, 9, 11, 14 – 16]).

Впервые на возможность существования геомагнитного предвестника землетрясения (ЗТ) указал автор работы [25] еще в 1964 г. За 1 час 06 мин до Большого землетрясения на Аляске (США) 27 марта 1964 г. с магнитудой $M \approx 9.2$ он обнаружил кратковременное аperiodическое увеличение на ~ 100 нТл уровня геомагнитного поля. Возникновение эффекта он объяснял пьезомагнитным эффектом пород, подвергнутых сжатию. Результат автора [25] с тех пор ни разу не подтвердился другими исследователями, поскольку, имело место простое совпадение двух событий.

С 1970-х гг. в Советском Союзе были развернуты масштабные исследования, направленные на поиск геомагнитных предвестников ЗТ [7, 26 – 33]. Основное внимание уделялось поиску импульсивных электромагнитных предвестников.

Поиск магнитных предвестников ЗТ, чаще всего не сопровождался детальным анализом геомагнитной обстановки. Так, автор [34] посчитал, что им выявлен магнитный предвестник вблизи эпицентра ЗТ в Loma Prieta ($M_s \approx 7.1$). Автор [35] через 19 лет после публикации статьи [34], сопоставив вариации магнитного поля с вариациями индексов a_p и D_{st} , пришел к выводу, что так называемый «предвестник» был вызван магнитной суббурей.

Авторы работы [36] сообщили, что ими за 3 часа до ЗТ обнаружен геомагнитный аperiodический предвестник Чилийского ЗТ, имевшего место 27 февраля 2010 г. ($M \approx 8.8$, глубина – 34 км). Длительность предвестника – 1 ч, максимальное возмущение – 690 нТл. В работе [37] убедительно доказано, что геомагнитное возмущение было связано с суббурей, а не с ЗТ.

Значительный интерес к предвестникам ЗТ резко вырос после Спитакского ЗТ, которое произошло 7 декабря 1988 г. ($M \approx 6.9$, глубина – 6 км) и привело к огромному числу человеческих жертв (см., например, [38, 39]). По данным работы [39] на расстоянии 129 км от эпицентра Спитакского ЗТ амплитуда $\Delta B \approx 0.03 - 0.2$ нТл, а $T \approx 1 - 10$ с.

Квазипериодические ($T \approx 20 - 50$ с) геомагнитные предвестники обсуждаются в статьях [27, 40 – 42]. По мнению авторов такие предвестники ЗТ возникали за несколько суток до ЗТ. По данным [40] $\Delta B \approx 0.1$ нТл.

Новый всплеск интереса к геомагнитным предвестникам ЗТ связан с работами [29 – 33], где в качестве предвестников ЗТ предлагалось рассматривать квазипериодические цуги колебаний – ультранизкочастотные (УНЧ) электромагнитные возмущения с периодами 40 – 250 с. Амплитуда предполагаемых предвестников составляла $\sim 1 - 5$ нТл [29 – 32]. Недостатком всех работ [29 – 32] является отсутствие анализа состояния космической погоды, например, так, как это сделано в работе [37]. В то же время известно, что периоды 40 – 250 с свойственны геомагнитным пульсациям космического происхождения.

Несмотря на отсутствие анализа состояния космической погоды, авторы [29 – 33] уверены, что описанные ими магнитные возмущения связаны с готовящимися ЗТ. Механизм их происхождения, как подчеркивают сами авторы [29 – 33], остается невыясненным.

Противоположной точки зрения придерживаются авторы работ [43 – 45]. На основании собственных исследований УНЧ магнитных возмущений в диапазоне периодов 0.1 – 100 с авторы пришли к выводу, что наблюдаемые колебания связаны с процессами в верхней атмосфере и не имеют отношения к ЗТ на стадии их подготовки. Определенный скептицизм высказывается и авторами работ [35, 46 – 48]. Авторы [49], показали, что квазигармонические УНЧ сигналы, описанные в целом ряде работ [29 – 32], скорее всего, имеют магнитосферное происхождение. Такое же происхождение имеют и сигналы «предвестников», описанные в статьях [27, 50].

Обзор электромагнитных предвестников ЗТ в УНЧ диапазоне выполнен в работе [46], а обзор механизмов магнитных возмущений – в работах [10, 16, 51].

На сегодняшний день у геофизиков нет единого мнения о существовании геомагнитного предвестника ЗТ. Если все же он и существует, обнаружить его затруднительно из-за преобладания геомагнитных вариаций космического происхождения.

В отличие от геомагнитных предвестников, возможность существования геомагнитных возмущений, последующих за свершившимися ЗТ, у геофизиков особых сомнений не вызывает [10, 16, 22, 46, 51 – 54]. По-видимому, впервые реакция геомагнитного поля на свершившиеся ЗТ была выявлена в 1964 г. (см., например, [52]). При этом было зарегистрировано колебание геомагнитного 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 Pс3 и Pс5, сгенерированные после ЗТ на Суматре 26 декабря 2004 г. ($M \approx 9.3$), описаны в работе [55]. Колебания Pс3 с $T \approx 30$ с авторы связали с распространением магнитозвуковой волны и колебанием магнитной силовой линии. Колебания Pс5 с периодом 3.6 мин, как считают авторы [53], обусловлены динамо-эффектом в нижней ионосфере, вызванным воздействием акустического импульса от ЗТ.

Геомагнитные возмущения, возбуждаемые сильными ЗТ, также описаны в работах [13, 54 – 56].

По известным 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 в системе СМСМИАЗ, уточнить механизмы и энергетику взаимодействия, дальность распространения возмущений от ЗТ и т. д.

Целью настоящей работы является описание результатов поиска возможной реакции геомагнитного поля в диапазоне периодов 1 – 1000 с на готовящиеся и свершившиеся Чуйские ЗТ в сентябре – октябре 2003 г.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

Чуйские землетрясения произошли на Алтае (Россия) [<https://www.usgs.gov>]. Координаты эпицентра следующие: 50°08' с. ш., 87°48' в. д. [57]. Глубина гипоцентра составляла 10 км. Главный толчок наблюдался 27 сентября 2003 г. в 11:33:26 UT (здесь и далее всемирное время) магнитудой $M_w = 7.3$. После главного удара произошло около 140 афтершоков. Главные из них зарегистрированы 27 сентября 2003 г. в 18:52:50 UT ($M_w = 6.7$) и 1 октября 2003 г. в 01:03:28 UT ($M_w = 7.0$) и в 03:55:10 ($M_w = 4.5$) (см., например, [52]). Их мы далее рассмотрим подробнее.

СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Состояние космической погоды характеризовалось индексами K_p , a_p и усредненными за 3 часа индексами D_{st} и AE . Эти результаты приведены в Таблице 1. Из этой таблицы видно, что сутки 27 сентября 2003 г. были магнитоспокойными. Сутки 1 октября 2003 г. были несколько возмущенными.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Магнитометр-флюксметр

Измерения выполнены с помощью несерийного магнитометра-флюксметра, расположенного в Магнитометрической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина [58]. Магнитометр регистрирует в цифровом виде уровень флуктуаций горизонтальных компонент геомагнитного поля с периодами $T = 1 - 1000$ с. Минимальные значения амплитуд флуктуаций определяются уровнем внутренних шумов. Чувствительность магнитометра составляет 0.5 – 500 пТл для $T = 1 - 1000$ с, соответственно.

Таблица 1. Сведения о состоянии космической погоды с 25 сентября по 2 октября 2003 г. (трехчасовые данные)

25.09	K_p	4+	4	4	4+	4	4	4+	4–
	a_p	18	4	3	3	2	2	3	9
	D_{st} , нТл	–36	–40	–43	–35	–34	–28	–35	–31
	AE , нТл	611	478	551	631	600	542	594	272
26.09	K_p	3	3–	4–	3+	2+	3	3	3
	a_p	18	4	3	3	2	2	3	9
	D_{st} , нТл	–23	–20	–27	–22	–19	–23	–24	–18
	AE , нТл	309	155	431	480	315	556	376	289
27.09	K_p	3+	1	1–	1–	0+	0+	1–	2+
	a_p	18	4	3	3	2	2	3	9
	D_{st} , нТл	–25	–21	–18	–13	–14.	–8	–7	–4
	AE , нТл	197	51	46	73	61	55	46	93
28.09	K_p	1–	0+	1+	1	1+	2–	1+	0+
	a_p	18	4	3	3	2	2	3	9
	D_{st} , нТл	–10	–12	–1	1	–7	–7	–7	–7
	AE , нТл	48	44	91	255	186	141	94	90
29.09	K_p	2–	2	0+	1+	1–	0+	1–	2–
	a_p	18	4	3	3	2	2	3	9
	D_{st} , нТл	–7	–5	–2	–2	–3	–3	1	3
	AE , нТл	155	113	80	249	108	147	91	102
30.09	K_p	0+	1–	2–	1	1+	2–	1–	2
	a_p	18	4	3	3	2	2	3	9
	D_{st} , нТл	5	8	8	3	–3	–9	–7	–4
	AE , нТл	42	71	164	201	218	301	87	132
1.10	K_p	3	2	1+	1	1	1	3	4
	a_p	18	4	3	3	2	2	3	9
	D_{st} , нТл	–12	–12	–15	–3	2	7	14	–29
	AE , нТл	300	177	280	210	122	47	164	521
02.10	K_p	3–	2+	1+	1–	1+	2–	2+	3–
	a_p	18	4	3	3	2	2	3	9
	D_{st} , нТл	–23	–21	–13	–8	–2	–2	–5	–8
	AE , нТл	140	63	34	32	58	157	165	305

Магнитометр ИМ-II подключен к специализированному микроконтроллерному регистратору (МКР), который выполняет ряд функций, таких как оцифровка магнитометрических сигналов и их фильтрация, а также сохранение информации в энергонезависимой USB флеш-памяти. Кроме того, МКР контролирует заряд аккумулятора и наличие напряжения в электросети.

Магнитометр состоит из активных индуктивных датчиков и моноблока, в состав которого входят полосовые фильтры для регистрации в узких диапазонах частот.

В системе также имеется приемник GPS сигналов BR-304, от которого МКР получает информацию о дате и текущем времени.

Систематически осуществляется считывание полученной информации для ее дальнейшей обработки.

Системный спектральный анализ

Первым этапом обработки магнитометрических сигналов, регистрируемых в относительных единицах, было их преобразование к сигналам $H(t)$ и $D(t)$, измеряемых в абсолютных единицах (в нТл). Дальнейшая обработка заключалась в цифровой фильтрации этих сигналов в определенных интервалах периодов. В этой работе использовались диапазоны периодов $T = 10 - 100$ с и $T = 100 - 1000$ с.

Обработка уже отфильтрованных данных была осуществлена с использованием системного спектрального анализа (ССА), применение которого для анализа нестационарных и коротких временных рядов имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционным преобразованием Фурье [59, 60].

При ССА совместно используется оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП).

ОПФ дает возможность рассматривать сигнал не на всей временной оси, а в определенном временном промежутке. Время существования сигнала разбивается на ряд интервалов, т. е. временные окна [59, 60]. ОПФ имеет вид:

$$S[f(t)] \equiv Sf(\omega, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)(t-b) \exp(-i\omega t) dt.$$

Приведенная формула описывает указанное преобразование, где $f(t)$ – сигнал, а $g(t-b)$ – оконная функция, b – параметр сдвига функции вдоль временной оси. Таким образом, определенному окну соответствует собственный набор комплексных амплитуд уже в частотной области. Однако принцип неопределенности $\Delta t \Delta f \approx 1$ приводит к невозможности получения одновременно хорошего разрешения по времени и по частоте. Основным недостатком ОПФ является одинаковое разрешение по частоте для различных частотных компонент сигнала.

АПФ имеет лучшее разрешение по искомым периодам [59, 60]. Оно дается следующим соотношением:

$$\hat{A}[f(t)] \equiv A, f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t-b}{a}\right) \exp\left(-i\pi\nu\left(\frac{t-b}{a}\right)\right) dt.$$

Однако ОПФ имеет лучшее разрешение по времени. Поэтому одновременное использование обоих преобразований дает возможность получить более полную информацию о периодах компонент сигнала и их положение на временной оси.

Используя ВП, можно достичь оптимального разрешения как по периодам, так и по времени [59, 60].

$$W[f(t)] \equiv Wf(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

где a – параметр масштабирования, $\frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ – вейвлет-спектр сигнала.

Основной задачей при использовании вейвлет-преобразования является выбор базисного вейвлета, который должен быть подобным к исследуемому сигналу. В данной работе используется вейвлет Морле:

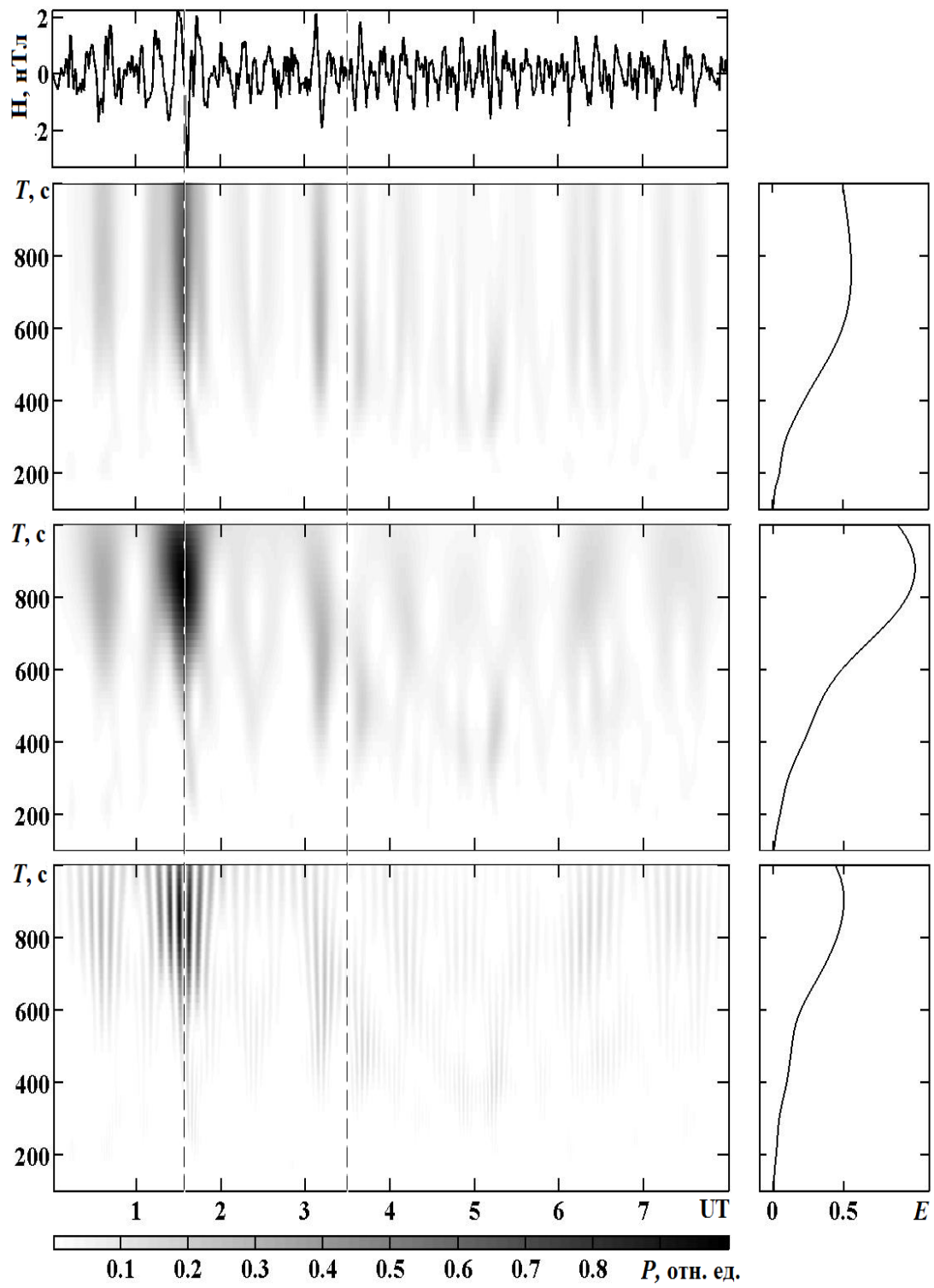
$$\psi(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cos(\omega t).$$

Таким образом, возможности всех указанных интегральных преобразований дополняют друг друга, компенсируя недостатки одного из них преимуществами других.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Предварительные результаты наблюдения геомагнитного поля, сопровождавшие Чуйские землетрясения, кратко описаны в работах [61, 62].

Первые сильные сейсмические удары зарегистрированы 27 сентября 2003 г. Из Рис. 1 видно, что существенные вариации уровня Н- и D-компоненты геомагнитного поля ночью и утром 27 сентября 2003 г. имели место вблизи моментов времени движения солнечного терминатора в ионосфере. В дневное

*a*

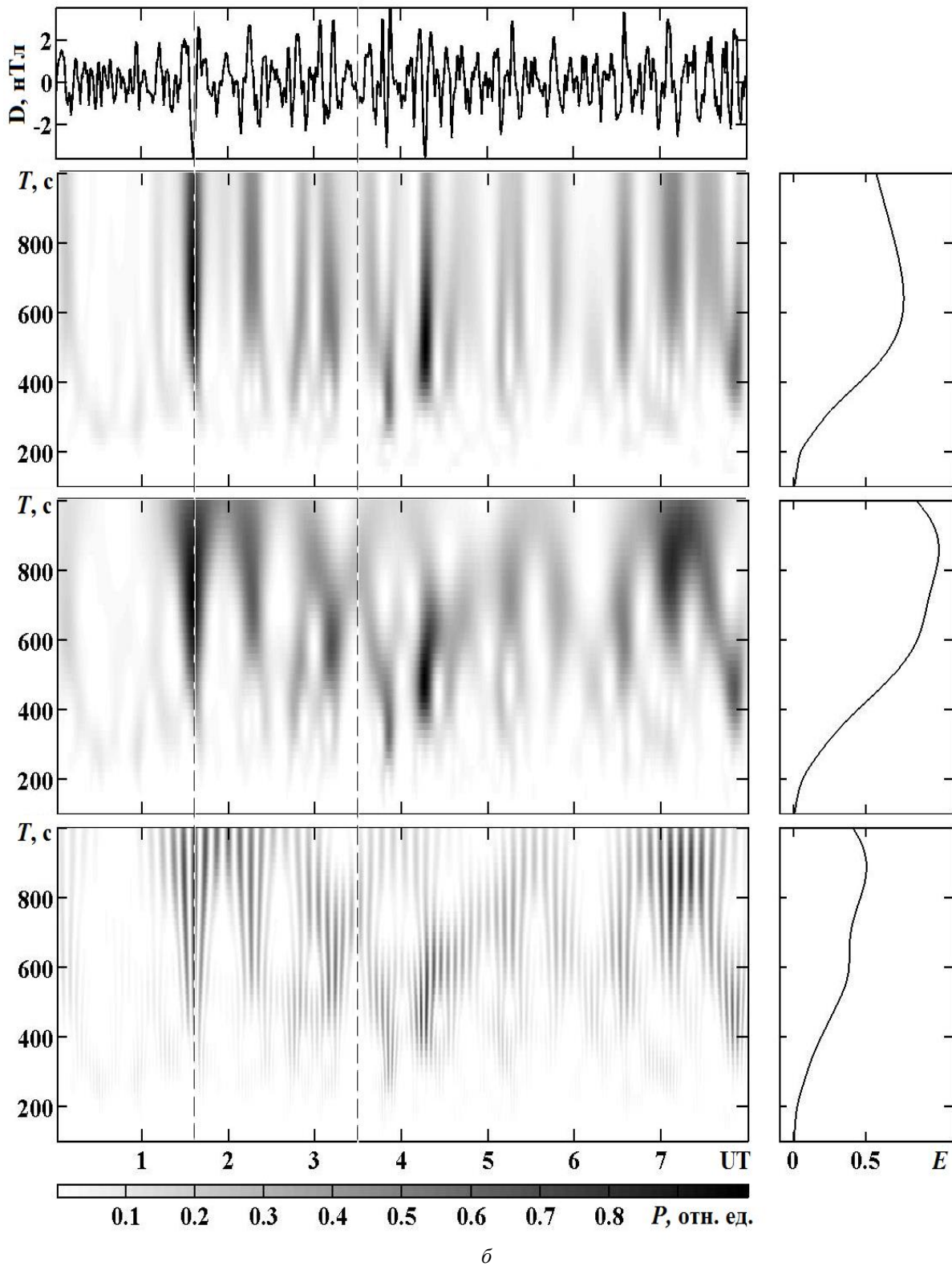


Рис. 1. Результаты ССА уровней H- (а) и D-компонент (б) геомагнитного поля 27 сентября 2003 г. Панели сверху вниз: анализируемый сигнал, результаты ОПФ, АПФ, и ВП. Справа показаны энергограммы (распределение энергии сигнала по периодам). Пунктирными линиями обозначен момент восхода Солнца на высоте 300 км и на уровне Земли в месте расположения обсерватории.

время с 08:50 до 10:00 и с 10:50 до 11:33 наблюдалось увеличение уровня обеих компонент примерно в 1.5 раза (Рис. 2). Существенно также изменился спектральный состав колебаний, преобладали гармоники с периодом $T \approx 10 - 12$ мин.

После ЗТ 27 сентября 2003 г. с магнитудой $M \approx 7.3$ характер вариаций Н- и D-компонент изменялся в интервалах времени 11:56 – 12:40 и 14:30 – 15:45 для Н-компоненты, а также в интервалах времени 11:56 – 12:45 и 14:15 – 16:00 для D-компоненты (см. Рис. 2).

После ЗТ 27 сентября 2003 г. с магнитудой $M \approx 6.7$ изменения характера вариаций уровня геомагнитного поля имели место в интервалах времени 19:09 – 20:03 и 21:28 – 22:30 для Н-компоненты, а для D-компоненты – в интервалах времени 19:13 – 20:00 и 20:25 – 22:05 (Рис. 3).

Следующие два мощных сейсмических удара наблюдались 1 октября 2003 г.

После ЗТ с магнитудой $M \approx 7.0$ изменения характера вариаций регистрировались в интервалах времени 01:08 – 01:30 и 01:38 – 02:30 для Н-компоненты и в интервалах времени 01:08 – 01:35 и 01:38 – 02:15 (Рис. 4).

За ЗТ с магнитудой $M \approx 4.5$ также последовали изменения характера вариаций обеих компонент (см. Рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ

С самого начала отметим, геомагнитные возмущения, сопровождавшие ЗТ, изучены значительно хуже, чем ионосферные возмущения от ЗТ (см., например, [63 – 73]). До последнего времени неизвестен был и механизм УНЧ предвестника ЗТ.

Значительные изменения характера вариаций уровня геомагнитного поля утром 27 сентября 2003 г. за 163 и 43 мин до ЗТ с $M \approx 7.3$ могли быть предвестником землетрясения (см. Рис. 2). Вариации, представленные на Рис. 1, были связаны с движением утреннего терминатора и магнитной возмущенностью. Действительно, в интервале времени 00:00 – 03:00 27 сентября 2003 г. $Kp = 3+$, $a_p = 18$, $D_{st} = -25$ нТл и $AE = 197$ нТл.

Возможные магнитные предвестники для ЗТ с магнитудой 6.7, 7.0 и 4.5 не выявлены.

Опишем кратко механизм возникновения геомагнитного предвестника.

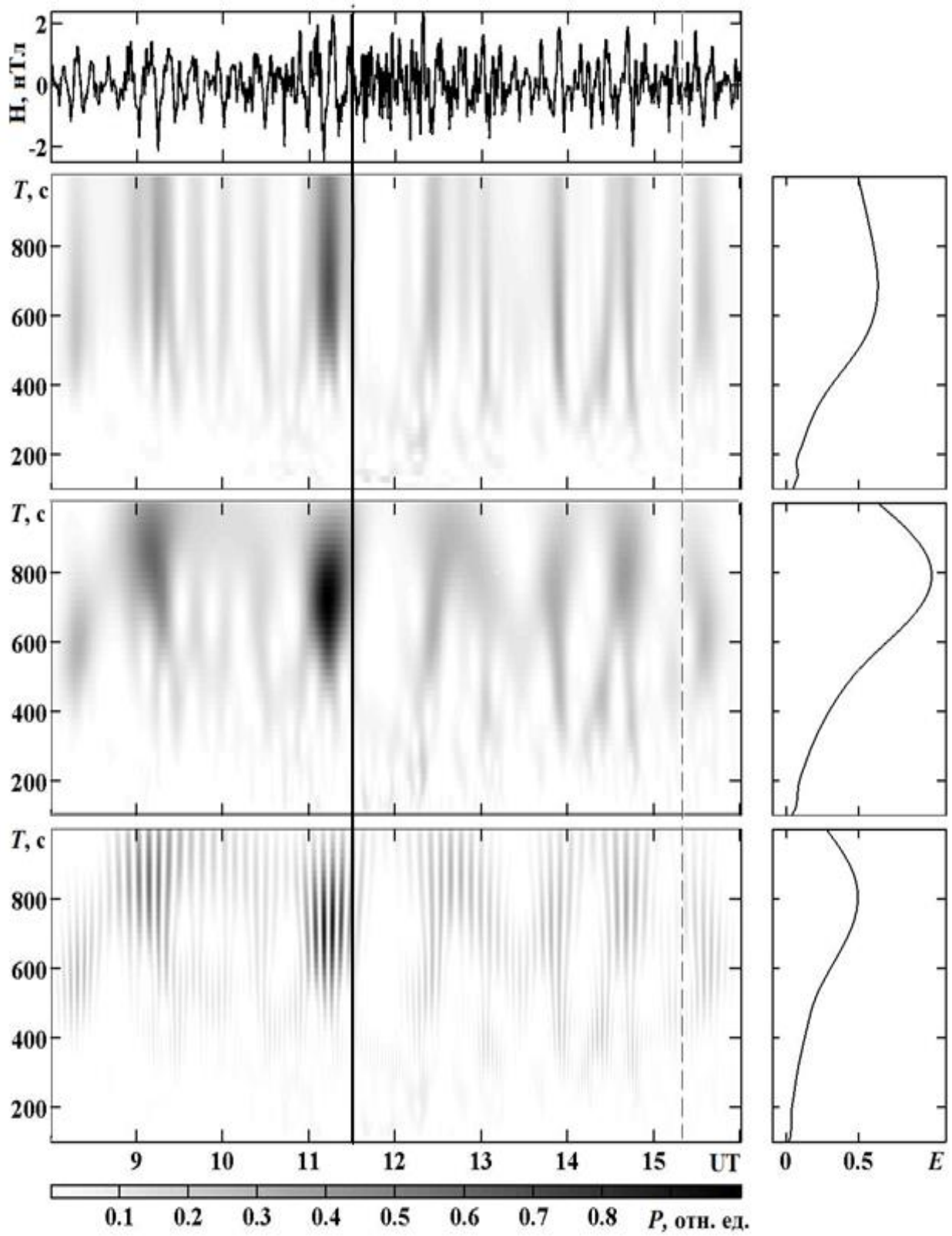
В работе [74] предложен механизм генерации квазипериодических магнитных предвестников ЗТ. Суть этого механизма состоит в следующем. Согласно концепции [75], в результате эманации радона происходит ионизация молекул воздуха. Образовавшиеся ионы затем служат центрами конденсации паров воды. В результате конденсации выделяется латентное тепло. Температура воздуха T_a над областью готовящегося ЗТ увеличивается по данным наблюдений на $\Delta T_a \approx 0.1 - 0.3$ К. Это приводит к конвекции нагретого воздуха и его турбулизации. Всплывающие нагретые образования воздуха одновременно с поступательным движением колеблются в вертикальной плоскости. Период колебаний зависит от размеров нагретого образования L и амплитуды скорости его колебаний. Наибольший диаметр образования близок к внешнему масштабу турбулентности, который в приземной атмосфере составляет $\sim 100 - 1000$ м, а наименьший – около 1 мм. Скорость конвекции и колебаний зависят от величины ΔT_a и L и, по нашим оценкам, изменяется в широких пределах – от ~ 0.01 до ~ 1 м/с. В результате колебаний нагретых образований генерируются акустико-гравитационные волны в диапазоне периодов от ~ 10 до 10^4 с. Эти волны практически без затухания достигают высот динамо-области ионосферы и вызывают геомагнитный эффект.

Последовавшие за ЗТ с магнитудой 7.3, 6.7, 7.0 и 4.5 вариации геомагнитного поля вполне могли быть вызваны сейсмическими событиями. Если это так, то оценим предполагаемые времена запаздывания и кажущиеся скорости распространения возмущений геомагнитного поля. Для кажущейся скорости имеем:

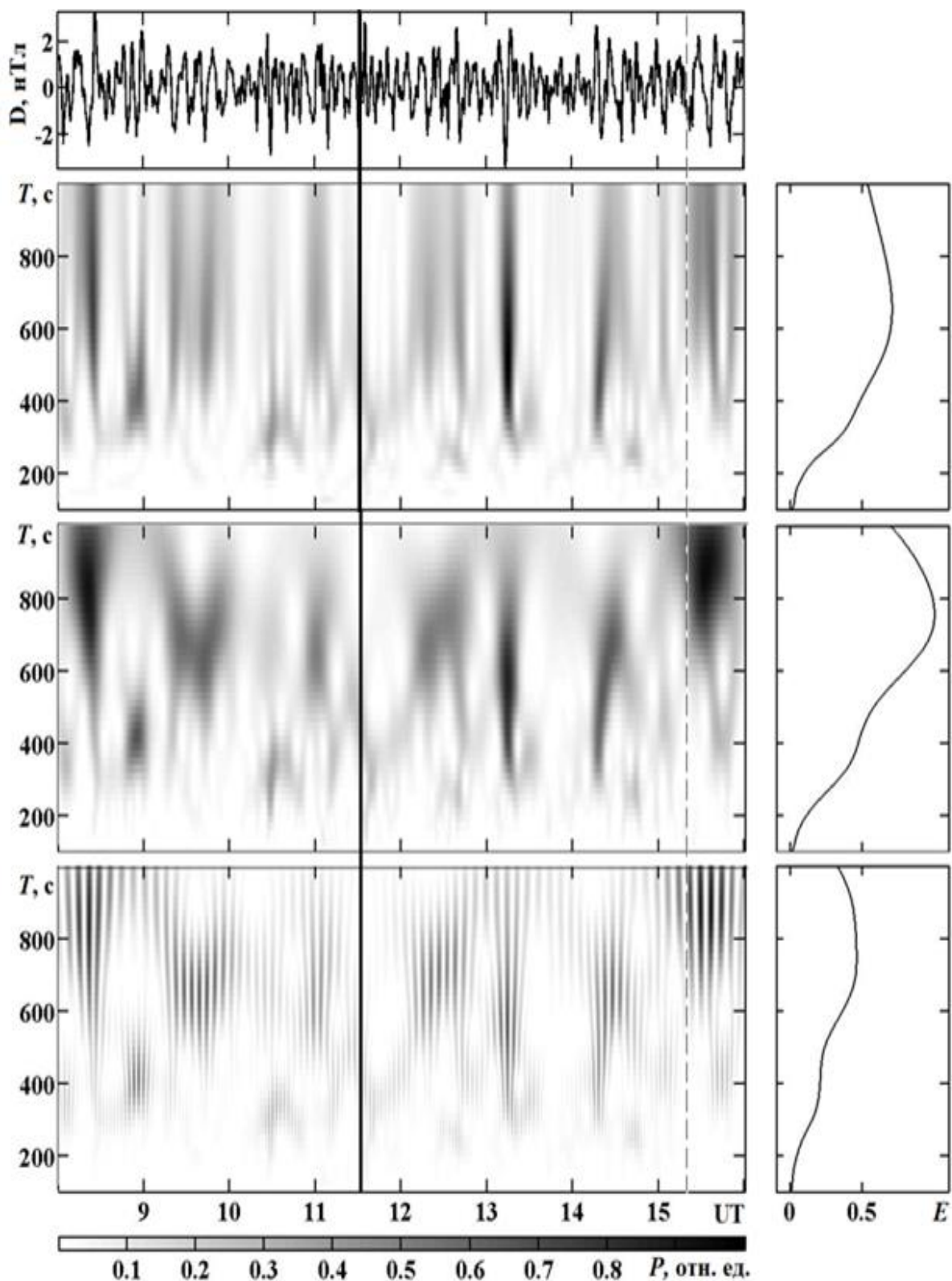
$$v = \frac{R}{\Delta t - \Delta t_0},$$

где $R \approx 3500$ км – расстояние от эпицентра до Магнитометрической обсерватории, Δt – время запаздывания реакции магнитного поля, $\Delta t_0 \approx 5$ мин – время распространения акустико-гравитационной волны от ЗТ до Е-области ионосферы, где находится источник геомагнитных возмущений, а i_0 – динамо-область ионосферы. Результаты оценок приведены в Табл. 2. Из Табл. 2 видно, что $v_1 \approx 1.9 - 5.3$ км/с, а $v_2 \approx 320 - 670$ м/с. Первая скорость близка к скорости сейсмических волн в литосфере Земли, а вторая – к скорости акустико-гравитационных волн в атмосфере Земли. Эти скорости неоднократно наблюдались другими исследователями [63 – 73, 76].

Механизмы геомагнитного эффекта в этих случаях хорошо известны. Сейсмические и акустико-гравитационные волны от ЗТ, распространяясь вдоль поверхности планеты и вдоль атмосферы соответственно, приводят к модуляции давления атмосферы, а на высотах ионосферы – к модуляции концентрации электронов и ионосферных токов, вызывая квазипериодические вариации геомагнитного поля.

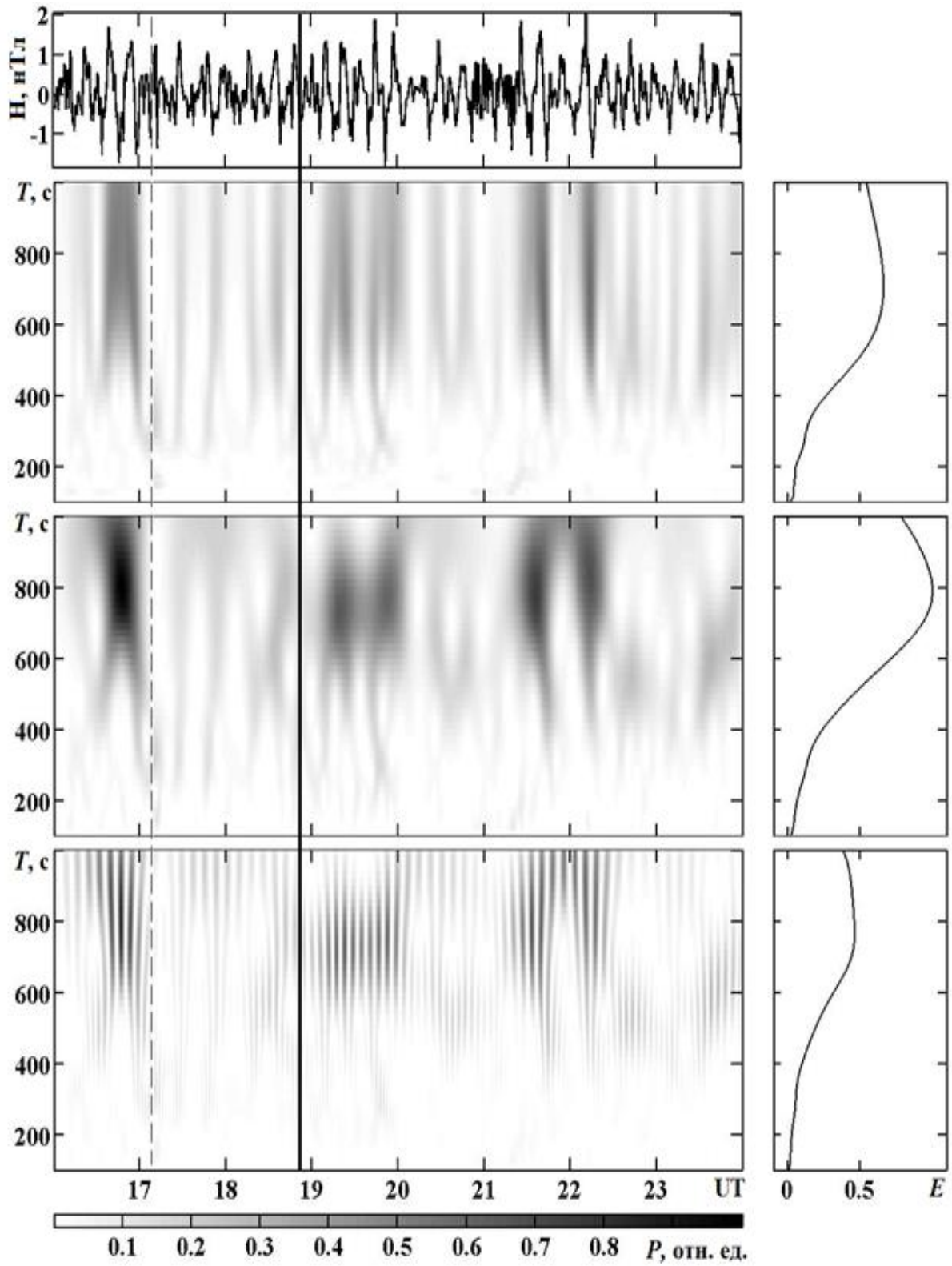


a

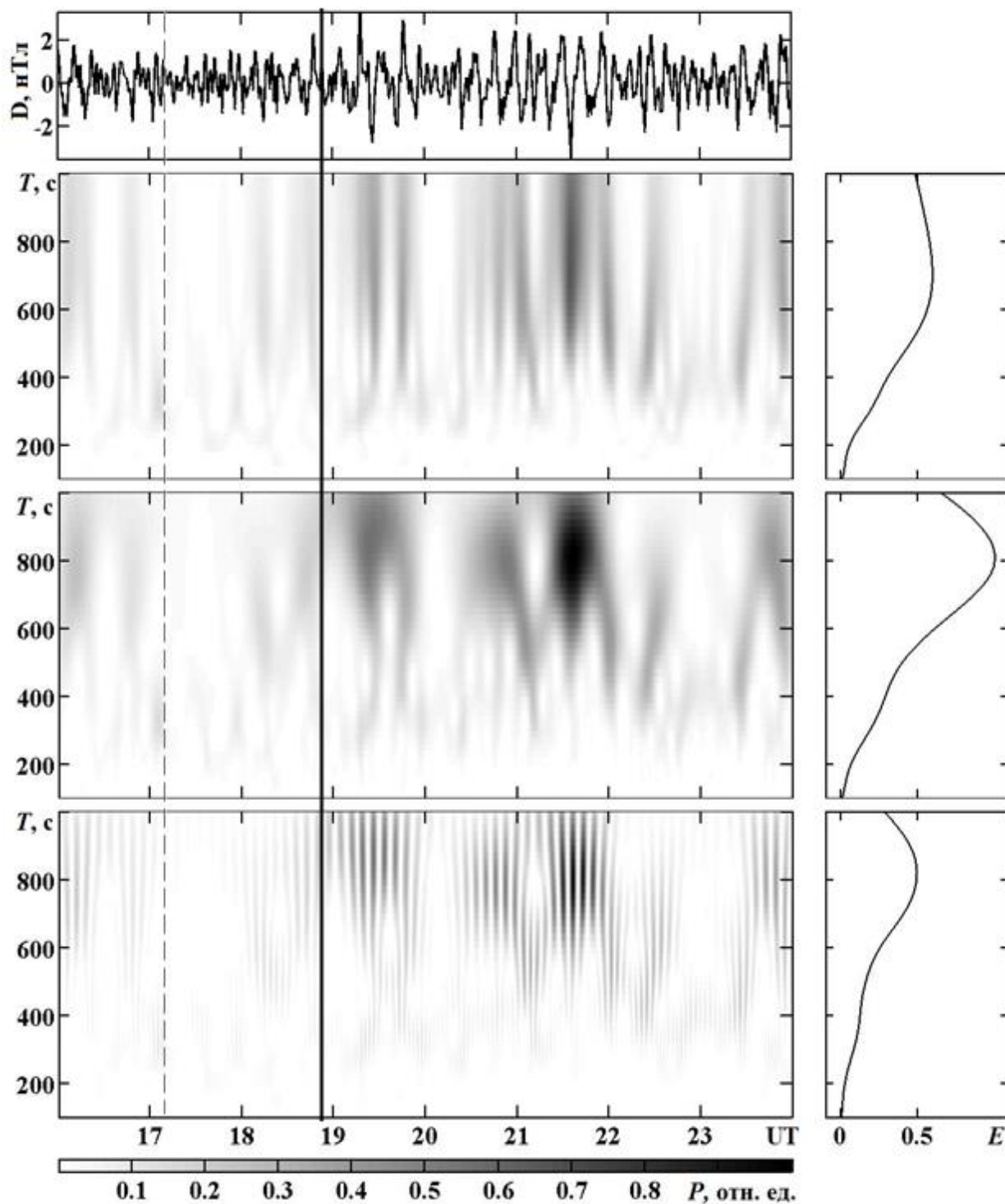


б

Рис. 2. Результаты ССА уровней H- (а) и D-компонент (б) геомагнитного поля 27 сентября 2003 г. Панели сверху вниз: анализируемый сигнал, результаты ОПФ, АПФ, и ВП. Справа показаны энергограммы (распределение энергии сигнала по периодам). Пунктирной линией обозначен момент захода Солнца на уровне Земли в месте расположения обсерватории. Сплошной линией обозначено время главного удара магнитудой 7.3.

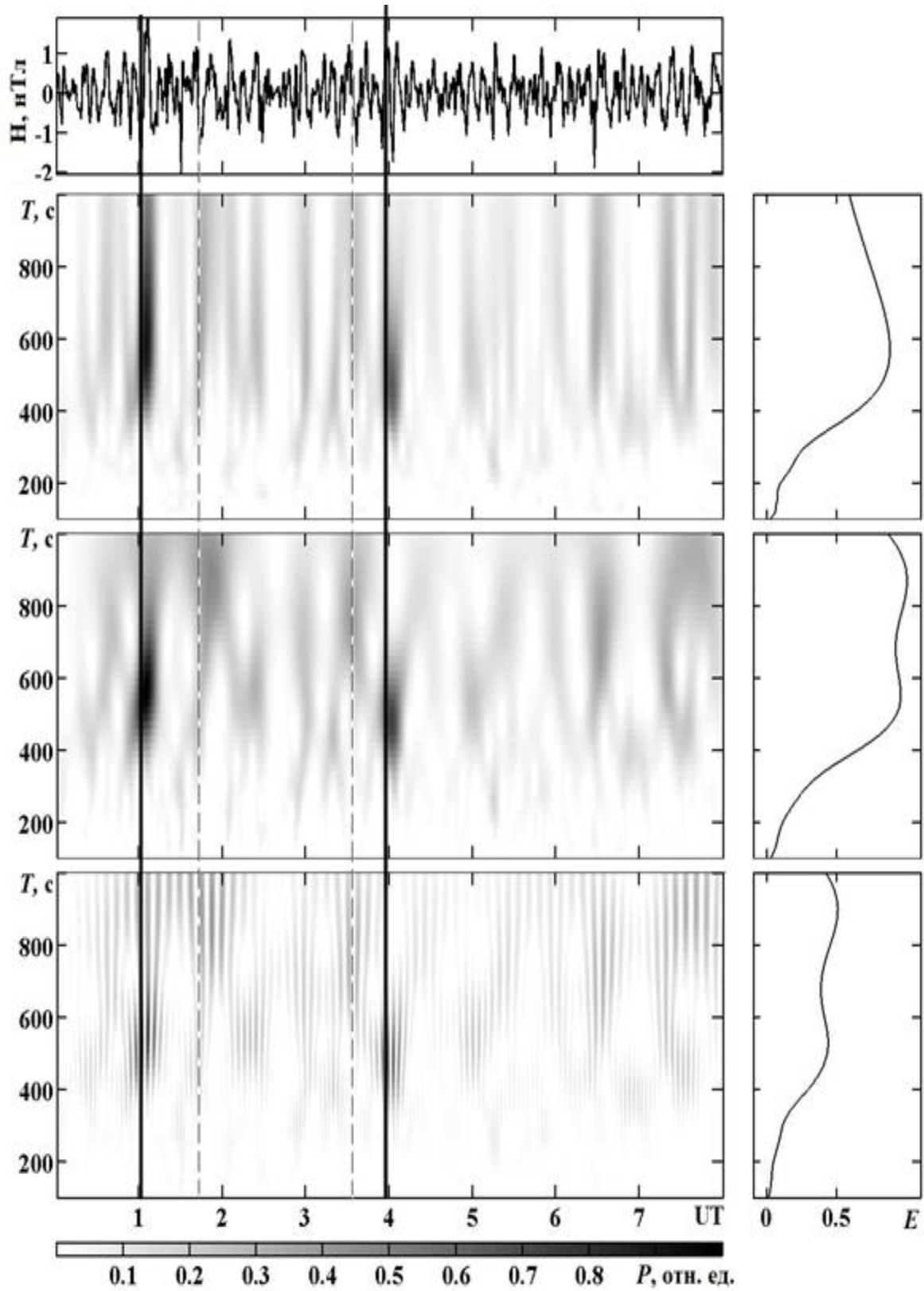


a

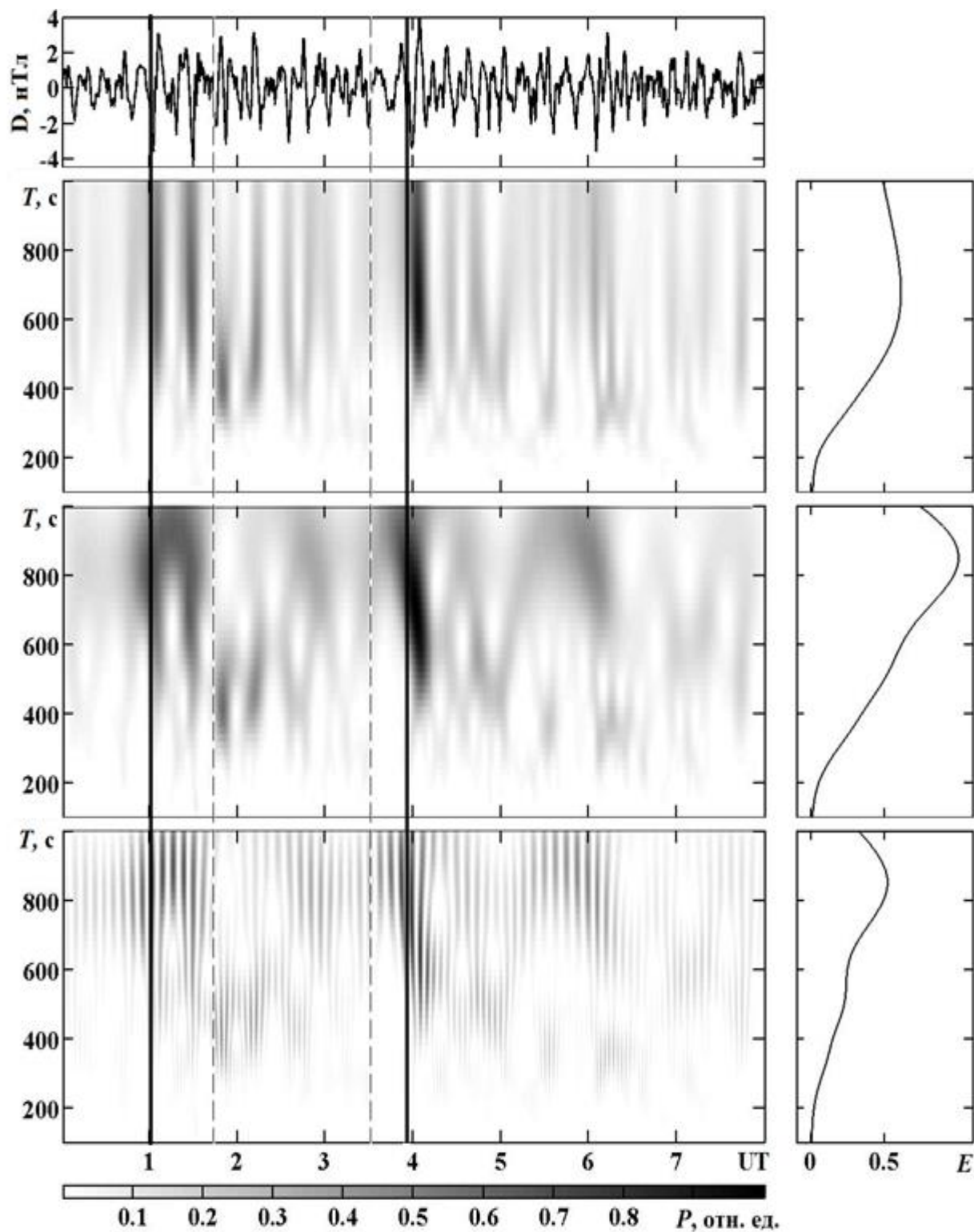


б

Рис. 3. Результаты ССА уровней H- (а) и D-компонент (б) геомагнитного поля 27 сентября 2003 г. Панели сверху вниз: анализируемый сигнал, результаты ОПФ, АПФ, и ВП. Справа показаны энергограммы (распределение энергии сигнала по периодам). Пунктирной линией обозначен момент захода Солнца на высоте 300 км. Сплошной линией обозначено время удара магнитудой 6.7.



a



б

Рис. 4. Результаты ССА уровней H- (а) и D-компонент (б) геомагнитного поля 1 октября 2003 г. Панели сверху вниз: анализируемый сигнал, результаты ОПФ, АПФ, и ВП. Справа показаны энергограммы (распределение энергии сигнала по периодам). Пунктирными линиями обозначен момент восхода Солнца на высоте 300 км и на уровне Земли в месте расположения обсерватории. Сплошными линиями обозначено время ударов магнитудой 7 и 4.5.

Отдельно необходимо остановиться на временах запаздывания, которые наблюдались после ЗТ 1 октября 2003 г. После ЗТ с $M \approx 7.0$ имеем $\Delta t \approx 5$ мин, а после ЗТ с $M \approx 4.5$ имеем $\Delta t \approx 0$ мин. Если обнаруженные вариации геомагнитного поля действительно связаны с ЗТ, то переносчиком возмущений могли выступать МГД волны, имеющие скорость в ионосфере ~ 1000 км/с. При этом время запаздывания на расстоянии в 3500 км составляет всего несколько секунд и не может быть точно определено при помощи магнитометра-флюксметра.

В то же время нельзя однозначно утверждать, что наблюдаемые вариации вызваны ЗТ, потому что с 00:00 до 03:00 1 октября 2003 г. магнитное поле было возмущенным ($Kp = 3-$, $a_p = 18$, $D_{st} = -23$ нТл и $AE = 140$ нТл).

Таблица 2. Основные параметры возмущений геомагнитного поля

M	Компонента	Δt_1 , мин	v_1 , км/с	Δt_2 , мин	v_2 , м/с
7.3	H	23	3.2	185	320
	D	23	3.2	170	350
6.7	H	16	5.3	135	450
	D	20	3.9	92	670
7.0	H	35	1.9	–	–
	D	35	1.9	–	–

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. За 43 и 163 мин до землетрясения с магнитудой 7.3 обнаружены квазипериодические вариации геомагнитного поля, которые могли быть магнитным предвестником землетрясения. Описан механизм такого предвестника.

2. После землетрясений с магнитудами 7.3, 6.7 и 7.0 обнаружены квазипериодические вариации геомагнитного поля. Такие вариации могли быть вызваны переносом возмущений при помощи сейсмических волн, имеющих скорости от 1.9 до 5.3 км/с, а также при помощи акустико-гравитационных волн, распространяющихся со скоростью от 320 до 670 м/с.

3. 1 октября 2003 г. изменение характера вариаций имело место при временах запаздывания от 0 до 5 мин. Если эти вариации связаны с землетрясениями, переносчиком возмущений могли выступать МГД волны. Нельзя однозначно утверждать, что наблюдаемые вариации вызваны ЗТ, потому что магнитное поле было возмущенным.


Работа К. П. Гармаша, Л. Ф. Черногора и С. Н. Шульги частично поддерживалась в рамках госбюджетных НИР, заданных МОН Украины (соответственно государственные номера 0118U002039, 0119U002538 и 0118U002033).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Authors' ORCID ID

Y. Luo  <https://orcid.org/0000-0002-3376-5814>

K. P. Garmash  <https://orcid.org/0000-0002-0844-5456>

L. F. Chernogor  <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

S. M. Shulga  <https://orcid.org/0000-0003-0626-4405>

REFERENCES

1. Pudovkin MI, Raspopov OM, Kleimenova NG. *Vozmushcheniya elektromagnitnogo polya Zemli Chast' 2* [Disturbances of the Earth's Electromagnetic Field, vol. 2]. Leningrad: LGU; 1976. 270 p.
2. Guglielmi AV. *MGD-volny v okolozemnoi plazme* [MHD-Waves in Near-Earth Plasma]. Moscow: Nauka; 1979. 139 p.
3. Nishida A. *Geomagnitnyi diagnoz magnitosfery* [Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere]. Moscow: Mir, 1980. 299 p. [In Russian].
4. Guglielmi AV, Troitskaya VA. *Geomagnitnye pul'satsii i diagnostika magnitosfery* [Geomagnetic Pulsations and Diagnostics of the Magnetosphere]. Moscow: Nauka; 1983. 208 p.
5. Likhter YaI, Gul'el'mi AV, Erukhimov LM, Mikhailova GA. *Volnovaya diagnostika prizemnoi plazmy* [Wave Diagnostics of Surface Plasma]. Moscow: Nauka; 1988. 215 p.
6. *Current research in Earth prediction*. Rikitake T, editor. Dordrecht: D. Reidel Publishing; 1981. 510 p.
7. Gokhberg MB, Morgunov VA, Pokhotelov OA. *Seismoelectromagnetic Phenomena* [Seismo-elektromagnitnye yavleniya], Moscow: Nauka; 1988. 180 p. [In Russian]

8. Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction. In: Hayakawa M, Fujinawa Y, editors. Tokyo: Terra Scientific Pub. Comp.; 1994. 677 p.
9. Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes. Hayakawa M, editor. Tokyo: Terra Scientific Pub. Comp.; 1999. 996 p.
10. Surkov VV. Elektromagnitnye efekty pri vzryvakh i zemletriaseniakh [Electromagnetic effects caused by earthquakes and explosions]. Moscow: MEPhI; 2000. 448 p. [in Russian].
11. Seismoelectromagnetics: lithosphere – atmosphere – ionosphere coupling. In: Hayakawa M, Molchanov OA, editors. Tokyo: Terra Scientific Pub. Comp.; 2002. 477 p.
12. Sobolev GA., Ponomarev AV. Fizika zemletryaseni i predvestnikov [Physics of Earthquakes and Precursors]. Moscow: Nauka; 2003. 270 p.
13. Molchanov OA, Hayakawa M. Seismo-electromagnetics and related phenomena: history and latest results. Tokyo: Terra Scientific Pub. Comp.; 2008. 189 p.
14. Electromagnetic phenomena associated with earthquakes. Hayakawa M, editor. Trivandrum: Transwaid Research Network; 2009. 279 p.
15. Earthquakes prediction studies: seismo electromagnetic. Hayakawa M, editor. Tokyo: Terra Scientific Pub. Comp.; 2013. 794 p.
16. Surkov V, Hayakawa M. Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields. Tokyo, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer; 2014. 486 p.
17. Chernogor LF. Geomagnitnye pulsacii, soputstvovashie dvizheniiu solnechnogo terminatora cherez magnitosopriazhennuiu oblast [Geomagnetic pulsations accompanied the solar terminator moving through magnetoconjugate region] *Radiofiz. Radioastron.* 2012 Mar; 17 (1): 57–66 [In Russian].
18. Chernogor LF. Krupnomasshtabnye vozmushcheniia magnitnogo polia Zemli, soprovozhdavshie padenie Cheliabinskogo meteoroida [Large-scale disturbances of the Earth's magnetic field accompanying the fall of the Chelyabinsk Meteoroid]. *Radiofiz. Elektron.* 2013; 18 (3): 47 – 54 [In Russian].
19. Chernogor LF. Geomagnetic field effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagn. Aeron.* 2014 Sep; 54: 613 – 624.
20. Chernogor LF. Magnetospheric Effects during the Approach of the Chelyabinsk Meteoroid. *Geomagn. Aeron.* 2018 April 13; 58: 252–265.
21. Bliokh PV, Nikolaenko AP, Filippov YuF. Global'nye elektromagnitnye rezonansy v polosti Zemlya–ionosfera [Global Electromagnetic Resonances in the Earth–Ionosphere Cavity]. Kiev: Naukova dumka; 1977. 181 p. [In Russian].
22. Gokhberg MB, Shalimov SL. Vozdeistvie zemletryaseni i vzryvov na ionosferu [Effect of Earthquakes and Explosions on the Ionosphere]. Moscow: Nauka; 2008. 295 p. [In Russian].
23. Chernogor LF. Radiofizicheskie i geomagnitnye efekty startov raket [Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rockets Launches]. Kharkov: KhNU imeni V. N. Karazina; 2009. 386 p. [In Russian].
24. Chernogor LF, 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; 2013. 542 p.
25. Moore GW. Magnetic disturbances preceding the 1964 Alaska earthquake. *Nature.* 1964 Aug 01; 203: 508 – 509.
26. Vorob'ev AA. O vozmozhnosti elektricheskikh razriadov v nedrakh Zemli [On the possibility of electric discharges in the Earth's interiors], *Geol. Geofiz.* 1970; 12: 3 – 13 [In Russian].
27. Gogatishvili YaM. [Geomagnetic precursor of intense earthquakes in the range of geomagnetic pulsations with frequencies of 1 – 0.02 Hz, *Geomagn. Aeron.* 1984; 24 (4): 697 – 700 [In Russian].
28. Sidorin AY. Predvestniki zemletriaseni [Earthquakes precursors]. Moscow: Nauka; 1992. 162 p.
29. Sobisevich LE, Kanonidi KKh, Sobisevich AL. Ultra low-frequency electromagnetic disturbances appearing before strong seismic events. *Dokl. Earth Sci.* 2009; 429 (5): 1549–1552.
30. Sobisevich LE, Sobisevich AL, Kanonidi KKh. Anomalnye geomagnitnye vozmushcheniia, navedennye katastroficheskimi tsunamicheskimi zemletriaseniami v raione Indonezii [Anomalous geomagnetic disturbances induced by catastrophic tsunamis producing earthquakes in the region of Indonesia]. *Geofiz. Zh.* 2012 Jan; 34 (5): 22–37 [In Russian].
31. Sobisevich LE, Sobisevich AL, Kanonidi KK, Misyuk OI. Geomagnetic disturbances in the geomagnetic field's variations at stages of preparation and implementation of the Elazig (March 8, 2010) and M 5.3 (January 19, 2011) earthquakes in Turkey. *Doklady Earth Sciences.* 2013; 449 (1): 324 – 327.
32. Sobisevich AL, Starostenko VI, Sobisevich LE, Kendzera AV, Shuman VN, Vol'fman YuM et al. The Black Sea earthquakes of late December 2012 and their manifestations in the geomagnetic field, *Geofiz. Zh.*, 2013; 35 (6): 54 – 70.
33. Sobisevich LE, Sobisevich AL, Kanonidi KKh. O nekotorykh anomalnykh protsessakh v geosferakh pri podgotovke i razviti seismicheskikh sobytii [Some anomalous geospheric processes during preparation and development of seismic events]. Trigger effects in geospheres, in *Materialy tret'ego Vserossiiskogo seminara-soveshchaniya (Proceedings of the Third All-Russian Workshop–Meeting)*, In: Adushkin VV, Kocharyan GG, editors. Moscow: GEOS; 2015. P. 284 – 294 [In Russian].

34. Fraser-Smith AC, Bernardi A, McGill PR, Ladd ME, Helliwell RA, Villard OG. Jr. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the M_s 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 1990 Aug; 17 (9): 1465–1468.
35. Campbell WH. Natural magnetic disturbance fields, not precursors, preceding the Loma Prieta earthquake. *J. Geophys. Res.* 2009 May 16; 114: A05.307.doi: 10.1029/2008JA013932.
36. Shestopalov IP, Belov SV, Soloviev AA, Kuzmin YuD. Neutron generation and geomagnetic disturbances in connection with the Chilean earthquake of February 27, 2010 and a volcanic eruption in Iceland in March – April 2010. *Geomagn. Aeron.* 2013 Feb; 53 (1): 124–135.
37. Romanova NV, Pilipenko VA, Stepanova MV. On the magnetic precursor of the Chilean earthquake of February 27, 2010. *Geomagn. Aeron.* 2015 Apr 09; 55 (2): 219 – 222.
38. Molchanov OA, Kopytenko YuA, Voronov PM, Kopytenko EA, Matiashvili TG, Fraser-Smith AC, et al. Results of magnetic field measurements near the epicenters of the Spitak ($M_s = 6.9$) and the Loma Prieta ($M_s = 7.1$) Earthquakes: comparative analysis. *Geophys. Res. Lett.* 1992 Jul 24; 19 (14): 1495 – 1498.
39. Kopytenko YuA, Matiashvili TG, Voronov PM, Kopytenko EA, Molchanov OA. Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories. *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 1993 Apr; 77 (1 – 2): 85 – 95.
40. Hayakawa M, Kawate R, Molchanov OA, Jumoto K. Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993. *Geophys. Res. Lett.* 1996 Feb 01; 23 (3): 241 – 244.
41. Schekotov A, Fedorov E, Hobara Y, Hayakawa M. ULF magnetic field depression as a possible precursor to the 2011/3.11 Japan earthquake. *Journal of Atmospheric Electricity.* 2013 Jan 01; 33 (1): 41–51.
42. Schekotov A., Fedorov E., Hobara Y., Hayakawa M. ULF magnetic field depression as a possible precursor to the 2011/3.11 Japan earthquake. *Radiofizika i elektronika.* 2013; 4 (18) (1): 47 – 52 [In Russian].
43. Fraser-Smith AC, McGill PR, Helliwell RA, Villard OG Jr. Ultra-low frequency magnetic field measurements in southern California during the Northridge earthquake of 17 January 1994. *Geophys. Res. Lett.* 1994 Oct 01; 21 (20): 2195 – 2198.
44. Fraser-Smith AC. Ultralow-frequency magnetic fields preceding large earthquakes. *Eos.* 2008 Jun 03; 89 (23): 211.
45. Karakelian D, Klemperer SL, Fraser-Smith AC, Thompson G. A. Ultra-low frequency electromagnetic measurements associated with the 1998 ($M_w = 5.1$) San Juan Bautista, California earthquake and implications for mechanisms of electromagnetic earthquake precursors. *Tectonophysics.* 2002 Nov 22; 359 (1 – 2): 65 – 79.
46. Park SK, Johnston M, Madden TR, Morgan FD, Morrison HF. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: a review of observations and mechanisms. *Rev. Geophys.* 1993 May; 31 (2): 117 – 132.
47. Geller RJ. Earthquake prediction: a critical review. *Geophys. J. Int.* 1997 Dec; 131 (3): 425 – 450.
48. Bakun WH, Aagaard B, Dost B, Ellsworth WL, Hardebeck JL, Harris RA, et al. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake. *Nature.* 2005 Oct 13; 437 (706): 969 – 974.
49. Kosterin NA, Pilipenko VA, Dmitriev EM. O globalnykh ultranizkочастотnykh elektromagnitnykh signalakh pered zemletriaseniiami [On global ultralow frequency electromagnetic signals prior to earthquakes]. *Geophysical investigations.* 2015; 16 (1): 24-34 [In Russian].
50. Bakhmutov VG, Sedova FI, Mozgovaya TA. Morphologic indicators in the structure of geomagnetic variations during the preparation of the strong earthquake of March 25, 1998 in the Antarctic, Ukrainian Antarctic Journal. 2003; 1: 54 – 60.
51. Surkov VV, Pilipenko VA. Magnetic effects due to earthquakes and underground explosions: a review. *Annali di geofisica.* 1997; 40 (2): 227 – 239.
52. Guglielmi AV. Ultra-low-frequency electromagnetic waves in the Earth's crust and magnetosphere. *Phys. Usp.* 2007 Dec; 50 (12): 1197–1216.
53. Iyemeri T, Nose M, Han D, Gao J, Hashizume M, Choosakul N, et al. Geomagnetic pulsations caused by the Sumatra earthquake on December 26, 2004. *Geophys. Res. Lett.* 2005 Oct 21; 32 (20): L20807.
54. Golikov YuV, d'Costa A, Pilipenko BA. Geomagnetic pulsations generated during strong earthquakes. *Geomagn. Aeron.* 1985 Oct; 25 (5): 824 – 828 [In Russian].
55. Hattori K. ULF geomagnetic changes associated with large earthquakes. *Terr. Atmos. Ocean Sci.* 2004 Sep; 15 (3): 329 – 360.
56. Hattori K. ULF geomagnetic changes with major earthquakes. In: *Earthquake prediction studies: Seismoelectromagnetic.* Hayakawa M, editor. Tokyo: Terra Scientific Pub. Comp.; 2013. P. 129 – 152.
57. Dubrov MN, Smirnov VM. Interdependent perturbations of the Earth's surface, atmosphere, and ionosphere. *Geomagn. Aeron.* 2013 Jan; 53 (1): 49 – 59. <https://doi.org/10.1134/S0016793213010088>
58. Kosmicheskii proekt «Ionosat-Mikro»: monografiia [Space Project “Ionosat-Micro”: monograph]. In: Zasukha SA, Fedorov OP, editors. Kyiv: Academperiodika; 2013, 218 p. [in Russian].
59. Lazorenko OV, Chernogor LF. Sistemnyi spektralnyi analiz signalov: teoreticheskie osnovy i prakticheskie primeneniia [The System Spectral Analysis: Theoretical Bases and Practical Applications] *Radio Phys. Radio Astron.* 2007 Jun; (2): 162 – 181 [In Russian].

60. Chernogor LF. Advanced Methods of Spectral Analysis of Quasiperiodic Wave-Like Processes in the Ionosphere: Specific Features and Experimental Results. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008 Oct 03; 48 (5): 652 – 673.
61. Chernogor LF, Smirnova EO. Fluktuatsii urovnia geomagnitnogo polia, soprovozhdavshie silneishie zemletriaseniia [Geomagnetic field level fluctuations accompanied strong earthquakes]. *Trudy mezhdunarodnoi Baikalskoi molodezhnoi nauchnoi shkoly po fundamentalnoi fizike*. 2017 Sep 11 – 16: Irkutsk, Russia. 2017. p. 155 – 157 [In Russian].
62. Chernogor LF, Smirnova E. O. Geomagnitnye fluktuatsii, sopushtvovavshie silneishim zemletriaseniam [Geomagnetic fluctuations accompanied strong earthquakes]. *Tezi 17 Ukrayinskoyi konferentsiyi z kosmichnikh doslidzhen*; 2017 Aug 21 – 25; Odessa, Ukraine. Kyiv, Ukraine; 2017. p. 164 [In Russian].
63. Calais E, Minster JB. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake. *Geophysical Research Letters*. 1995 May 01; 22 (9): 1045 – 1048.
64. Afraimovich EL, Perevalova NP, Plotnikov AV, Uralov AM. The shock acoustic waves generated by earthquakes. *Ann. Geophys.* 2001 Jan 01; 19: 395 – 409.
65. Ducic V, Artru J, Lognonné P. Ionospheric remote sensing of the Denali earthquake Rayleigh surface waves. *Geophysical Research Letters* [Internet]. 2003 Sep 25; 30 (18): 1951. Available from: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2003GL017812> doi: 10.1029/2003GL017812
66. Astafyeva E, Afraimovich EL. Long-distance traveling ionospheric disturbances caused by the great Sumatra-Andaman earthquake on 26 December 2004. *Earth Planets Space*. 2006 Sep 16; 58(8): 1025 – 1031.
67. Liu JY, Tsai YB, Chen SW, Lee CP, Chen YC, Yen HY, et al. Giant ionospheric disturbances excited by the M9.3 Sumatra earthquake of 26 December 2004. *Geophysical Research Letters*. 2006 Jan; 33: L02103.
68. Lognonné P, Artru J, Garcia R, Crespon F, Ducic V, Jeansou E, et al. Ground based GPS imaging of ionospheric post-seismic signal. *Planet. Space Sci.* 2006 Apr; 54 (5): 528 – 540.
69. Rolland LM, Lognonné P, Astafyeva E, Kherani EA, Kobayashi N, Mann M, et al. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. *Earth Planets Space*. 2011 Jun; 63 (7): 853 – 857.
70. Garcia RF, Doornbos E, Bruinsma S, Hebert H. Atmospheric gravity waves due to the Tohoku-Oki tsunami observed in the thermosphere by GOCE. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014 Apr 27; 119: 4498–4506 doi:10.1002/2013JD021120.
71. Jin S, Occhipinti G, Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics. *Earth-Science Reviews*. 2015 Aug; 147: 54 – 64 doi:10.1016/j.earscirev.2015.05.003
72. Heki K. Ionospheric disturbances related to Earthquakes. In *Advances in Ionospheric Research: Current Understanding and Challenges*. AGU/Wiley Book; 2018. [In press].
73. Meng X, Vergados P, Komjathy A, Verkhoglyadova O. Upper Atmospheric Responses to Surface Disturbances: An Observational Perspective. *Radio Sci.* 2019 Oct; *Grand Challenges in the Earth and Space Sciences*: 1076 – 1098. DOI: 10.1029/2019RS006858.
74. Chernogor LF. Possible Generation of Quasi-Periodic Magnetic Precursors of Earthquakes. *Geomagn. Aeron.* 2019 Jun 17; 59: 374–382.
75. Pulnits SA, Ouzounov DP, Karelin AV, Davidenko DV. Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system. *Geomagn. Aeron.* 2015 Jul 25; 55: 521–538.
76. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019 May; 186:88–103.