

УДК 550.385.37: 550.388

Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ВБЛИЗИ г. ХАРЬКОВА, СОПУТСТВОВАВШИЕ ПРОХОЖДЕНИЮ СОЛНЕЧНОГО ТЕРМИНАТОРА. 1. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Проаналізовано результати спостережень варіацій геомагнітного поля поблизу м. Харкова в діапазоні періодів 1–1000 с, які супроводжували проходження сонячного термінатора у ранкові та вечірні часи у 2002–2008 рр. Проведено спектральний аналіз, за допомогою якого виявлено квазіперіодичні збурення, викликані рухом сонячного термінатора, та оцінено їхні параметри. Виявилось, що період збурень складає 9–11 хв, тривалість — 45–55 хв і амплітуда — 3–5 нТл. Запізнення реакції геомагнітного поля на проходження сонячного термінатора змінювалось в межах 30–40 та 80–90 хв для ранкового і 60–80 хв для вечірнього термінатора.

ВВЕДЕНИЕ

При изучении отклика геомагнитного поля на старты ракет часто возникает задача выделения и разделения эффектов прохождения солнечного терминатора (СТ) и эффектов стартов ракет. Дело в том, что космические аппараты преимущественно стартуют в утренние и вечерние часы [6, 20–22].

Согласно оценкам вариации магнитного поля, вызванные прохождением СТ, могут достигать нескольких нанотесла, что соизмеримо с величинами наблюдаемых нами геомагнитных эффектов стартов ракет [6, 20–22].

Максимальная величина эффектов в атмосфере, генерируемых СТ, скорее всего, наблюдается в диапазоне высот примерно 100–180 км [14]. Это связано с поглощением энергии в термосфере. Здесь имеют место наибольшие температурные градиенты [14]. Примерно на этих же высотах эффективно генерируются волны стартовыми ракетами [24].

Для повышения надежности выделения возмущений, вызванных стартами и полетами ракет, на фоне естественных переходных процес-

сов возникла необходимость детального изучения эффектов СТ в геомагнитном поле как отдельного источника высокоэнергетического воздействия. Разумеется, что подобное изучение имеет и самостоятельное значение.

Солнечный терминатор относится к систематически действующим источникам генерации возмущений во всех подсистемах системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ) [15–17, 20]. В настоящее время есть ряд теоретических моделей, которые позволяют с определенной точностью описать структуру и параметры СТ как источника высокоэнергетического воздействия на среду, а также установить основные пространственно-временные параметры генерируемых им возмущений [11].

Изучению эффектов СТ посвящен ряд работ [1–4, 7, 11–14, 23, 24]. Так, в работе [12] теоретически показано, что переходные процессы, вызываемые движением СТ, приводят к генерации перемещающихся волновых возмущений, турбулентных образований, неоднородностей электронной концентрации, устойчивых структур нейтральной компоненты, вариаций электрического и магнитного полей, возникновению и усилению неустойчивостей вблизи области воздействия.

Комплексные экспериментальные работы [1–4, 7, 23, 24] отчасти подтверждают результаты теоретического моделирования. В настоящее время эффект генерации солнечным терминатором возмущений в атмосфере и ионосфере не вызывает сомнений. Вопрос возможной генерации возмущений геомагнитного поля, насколько нам известно, до сих пор не исследовался.

Целью настоящей работы является выявление и анализ возмущений, генерируемых прохождением солнечного терминатора в утренние и вечерние часы, по результатам наблюдений флуктуации геомагнитного поля в диапазоне периодов 1–1000 с вблизи г. Харькова.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Магнитометр-флюксметр. Несерийный высокочувствительный магнитометр, включенный в состав программно-аппаратного комплекса, размещен в обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (с. Граково, Чугуевский район, Харьковская обл.) [5]. Его геофизические координаты: 49°40' с. ш., 36°50' в. д., геомагнитные координаты: +45°20' геомагнитной широты, 119°20' в. д.

Магнитометр-флюксметр измеряет уровень флуктуации. Его чувствительность составляет 0.5–500 пТл в диапазоне периодов 1–1000 с соответственно.

Методики измерений и анализа аналогичны описанным авторами в работе [6].

Для исследований возмущений, вызванных СТ, целесообразно выбрать четыре характерных геофизических временных периода: вблизи зимнего и летнего солнцестояний, весеннего и осеннего равноденствий. Как утверждается в работе [14], в периоды весеннего и осеннего равноденствий скорости распространения возмущений параметров ионосферы максимальны, а влияние диффузии минимально. Именно в эти периоды эффекты в ионосфере наблюдались более четко [12, 14].

Определению подлежали времена запаздывания возможной реакции геомагнитного поля на прохождение СТ, ее продолжительность и спектральный состав возникающих возмуще-

ний. В качестве гипотезы, опираясь на данные [22], примем, что геомагнитные пульсации эффективно генерируются волновыми возмущениями, возникающими в атмосфере и ионосфере под действием СТ в диапазоне высот 100–180 км. Их механизм связан с модуляцией этими волновыми возмущениями токовой струи. Исходя из этого, для утреннего СТ в качестве высоты отсчета выбиралась высота восхода Солнца на уровне 200 км, для вечернего — заход Солнца на уровне Земли.

Периоды квазипериодических процессов определялись при помощи системного спектрального анализа, включающего в себя оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП) на основе вейвлета Морле, детально описанного в работах [9, 10, 18]. Кроме динамических спектров, вычислялись энергограммы, представляющие собой распределение средней энергии колебаний по периодам.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Утренний солнечный терминатор. Для примера рассмотрим четыре случая прохождения утреннего СТ в зимний, весенний, летний и осенний сезоны. Начало реакции отсчитывается от момента восхода Солнца на высоте 200 км над уровнем Земли вблизи места расположения обсерватории.

На рис. 1 приведены временные вариации уровней горизонтальных компонентов геомагнитного поля и их спектров, сопровождавшие восход Солнца 15 декабря 2003 г. в 03:45 (здесь и далее используется время UT). Изменения характера (незначительное увеличение амплитуды и уменьшение периода до 5–7 мин) сигнала *H*- и *D*-компонентов имели место через 35 и 44 мин после восхода Солнца на высоте 200 км и продолжались 44 мин. Следующие возмущения имели место через 88–90 мин, продолжительности составляли 38–42 мин. Эти возмущения проявлялись как подавление колебаний в обоих компонентах сигнала. Преобладали периоды 6–10 мин.

Результаты измерений и анализа вариаций геомагнитного поля, сопутствовавшие СТ

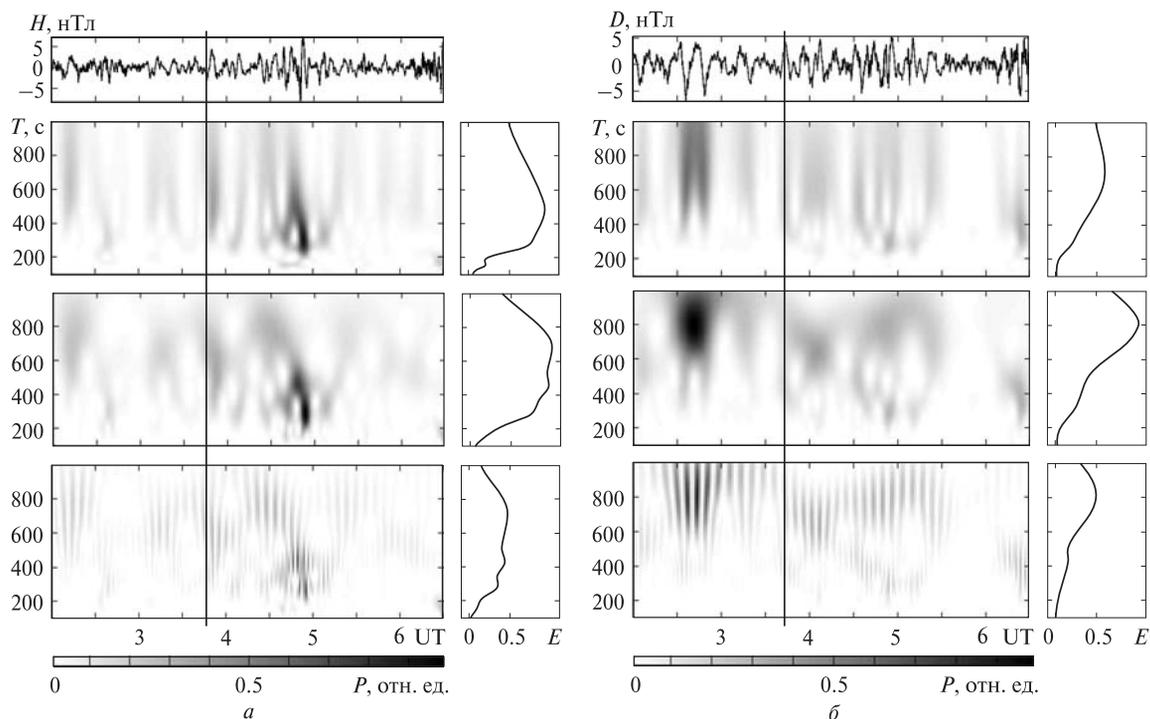


Рис. 1. Временные вариации H - и D -компонентов геомагнитного поля (панели a и b) и соответствующие им периоды T , полученные методами ОПФ, АПФ, ВП (сверху вниз), а также энергограммы $E(T)$ (справа) в диапазоне периодов 100–1000 с, сопровождавшие прохождение солнечного терминатора 15 декабря 2003 г. Сплошной вертикальной линией показан момент восхода Солнца на высоте 200 км вблизи г. Харькова

16 марта 2004 г. (02:28), приведены на рис. 2. С запаздыванием 35 мин в H -компоненте фиксировалось появление высокочастотной составляющей, волновой процесс длился 40 мин с периодом 7 мин. В D -компоненте волновой процесс был выражен слабее и имел запаздывание 30 мин, продолжительность 40 мин и преобладающий период около 13 мин. Возмущение второго типа имело запаздывание 81–95 мин и длительность 46–48 мин. Преобладающие периоды составляли 13–14 мин для обоих типов возмущений.

На рис. 3 представлены временные вариации H - и D -компонент геомагнитного поля и результаты их спектрального анализа, сопутствовавшие прохождению утреннего СТ 16 июня 2003 г. в 22:52. Значительные изменения характера вариаций с увеличением амплитуды в два раза наблюдалось через 23–24 мин для H - и D -компонент соответственно. Возмущения про-

должались около 37 мин и имели периоды 8–14 мин. Следующее изменение характера сигнала продолжительностью 40 мин и периодом 13 мин, хорошо выраженное в D -компоненте, имело место через 94 мин после прохождении терминатора. В H -компоненте это волновое возмущение проявлялось слабо.

Пример временных вариаций уровня компонент геомагнитного поля и соответствующих им спектров, последовавших после восхода Солнца в 01:34 13 августа 2006 г., приведены на рис. 4. Характерный волновой процесс наблюдался через 41 и 35 мин для H - и D -компонент соответственно. Наблюдалось усиление уровня сигнала примерно в 1.5 раза, которое продолжалось около 40 мин. Возмущение второго типа в этот день наблюдалось с запаздыванием 120–130 мин и имело продолжительность около 50 мин. Периоды волновых процессов составляли 8–10 мин.

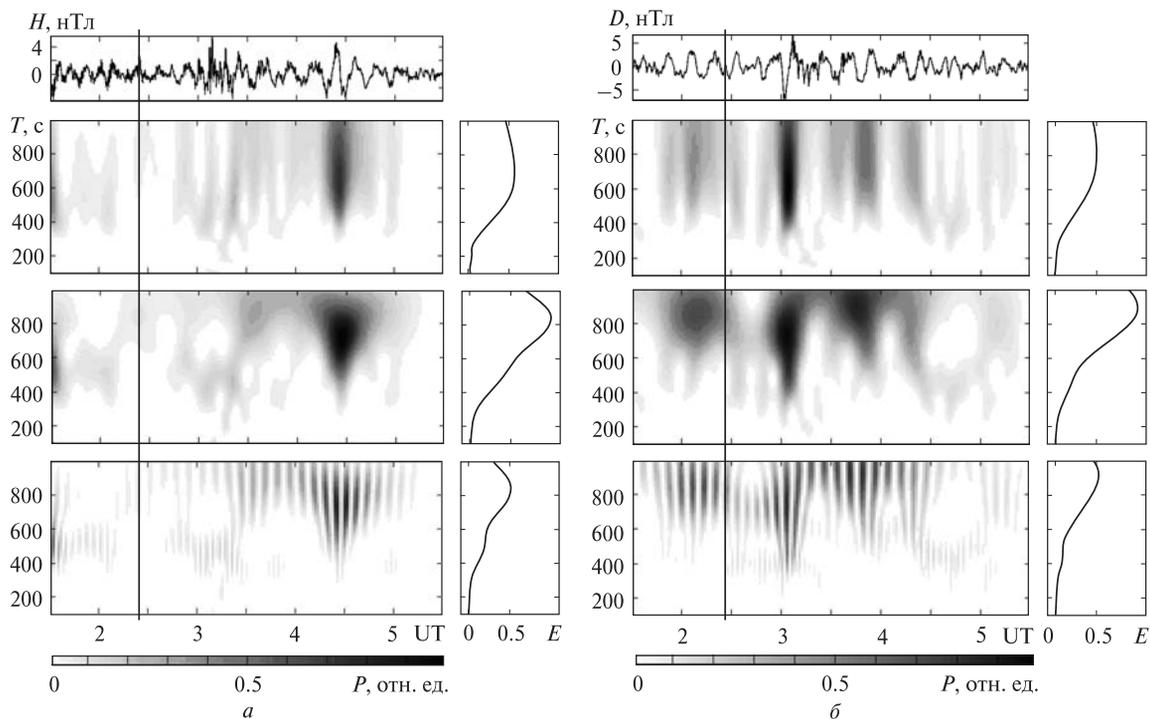


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для 26 марта 2004 г.

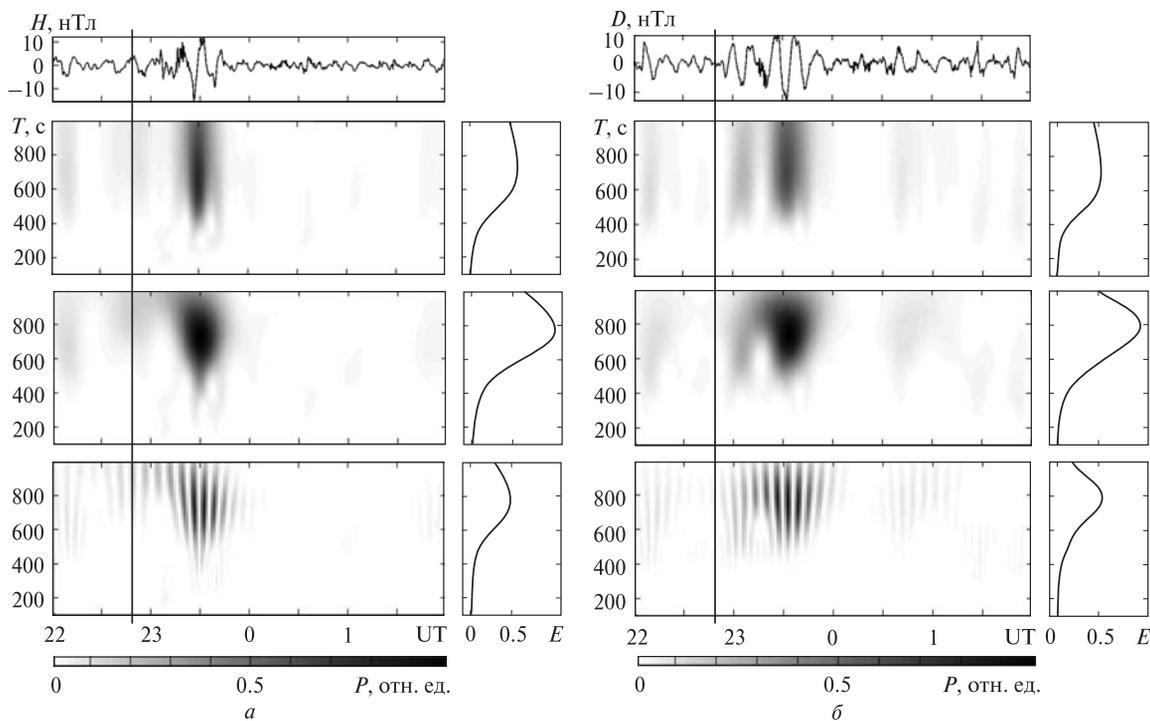


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для 16 июня 2003 г.

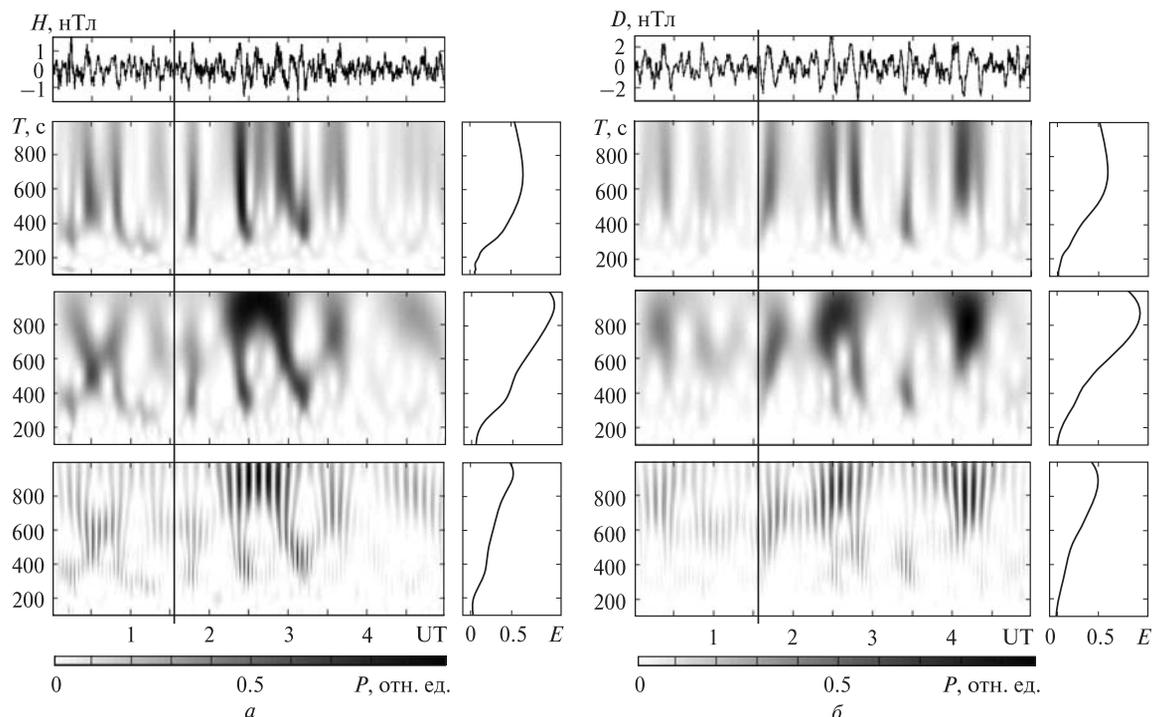


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для 13 сентября 2006 г.

Вечерний солнечный терминатор. Рассмотрим четыре случая прохождения вечернего СТ в зимний, весенний, летний и осенний сезоны. Начало реакции отсчитывается от момента захода Солнца на уровне Земли вблизи расположения обсерватории

Временные вариации уровней горизонтальных компонентов геомагнитного поля и их спектров, сопровождавшие движение вечернего СТ, приведены на рис. 5. Заход Солнца на уровне Земли 16 декабря 2003 г. наблюдался в 13:34. Эффекты СТ, выраженные как изменение амплитуды и периода с продолжительностью около 55 мин, наблюдались через 60 мин в H -компоненте. В D -компоненте имело место возмущение с запаздыванием 75–80 мин и продолжительностью 40 мин. Преобладающие периоды составляли 9–12 мин для H - и D -компонентов сигнала.

Вариации уровня компонентов геомагнитного поля при прохождении СТ 31 марта 2005 г. в 16:02 показаны на рис. 6. Примерно через 50 мин наблюдалось изменение характера сиг-

нала, которое продолжалось примерно 40 мин и сопровождалось увеличением амплитуды в 1.5–2 раза и появлением высокочастотной составляющей в H -компоненте. Периоды составляли 7 и 13 мин для H - и D -компонентов соответственно.

На рис. 7 представлены временные вариации H - и D -компонентов магнитного поля Земли, сопутствовавшие заходу Солнца 26 июня 2003 г. в 17:46. Характерный волновой процесс наблюдался примерно через 40–45 мин в H - и D -компонентах соответственно. Продолжительность возмущений была около 30–40 мин. Периоды волновых процессов составляли 8–10 мин.

Прохождение вечернего терминатора 13 сентября 2004 г. в 15:55 сопровождалось ростом амплитуд $H(t)$ и $D(t)$ примерно в 1.5–2 раза и появлением высокочастотной составляющей в обоих компонентах (рис. 8). Возмущения имели запаздывания 80–90 мин. Продолжительность этого процесса была около 50–70 мин. Периоды составляли 10–13 мин для обоих компонентов сигнала.

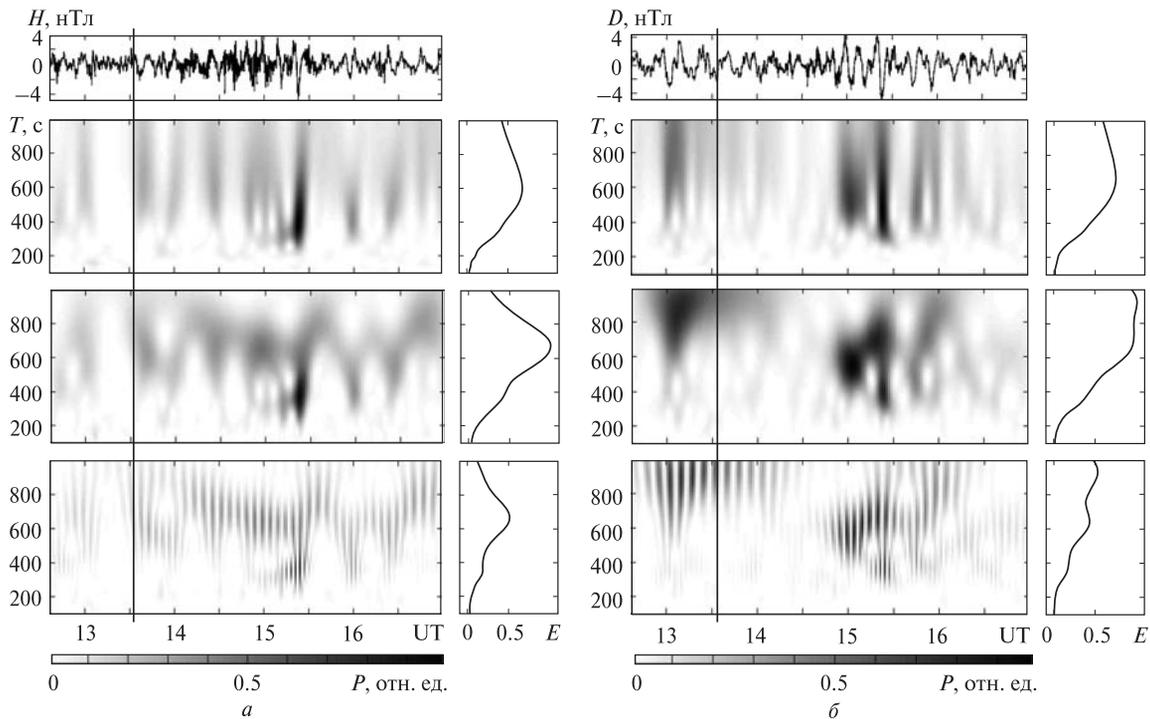


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, для 6 декабря 2006 г. Сплошной вертикальной линией показан момент захода Солнца на уровне Земли вблизи г. Харькова

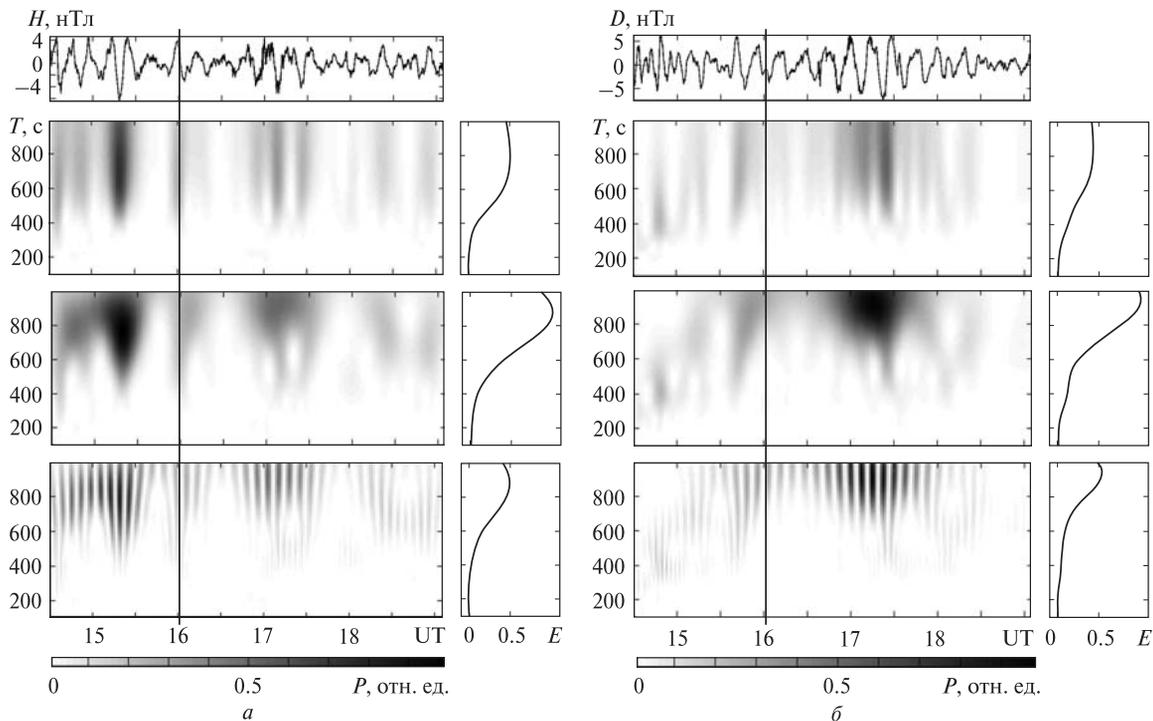


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для 31 марта 2005 г.

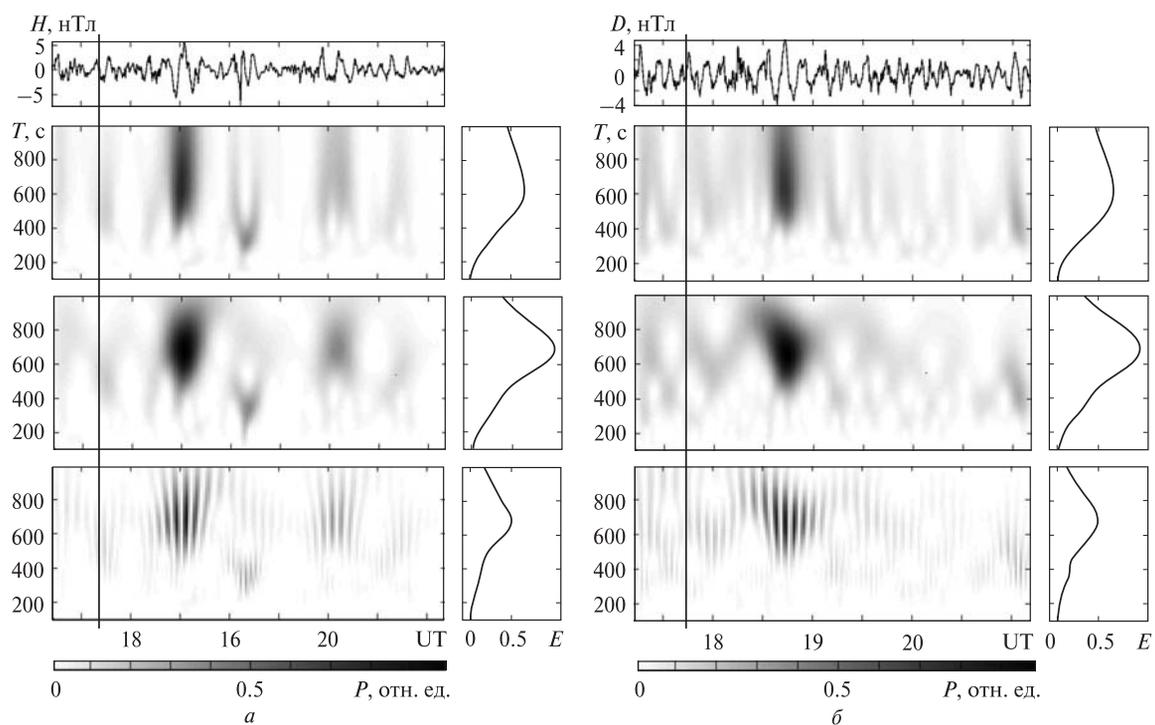


Рис. 7. То же, что на рис. 5, для 26 июня 2003 г.

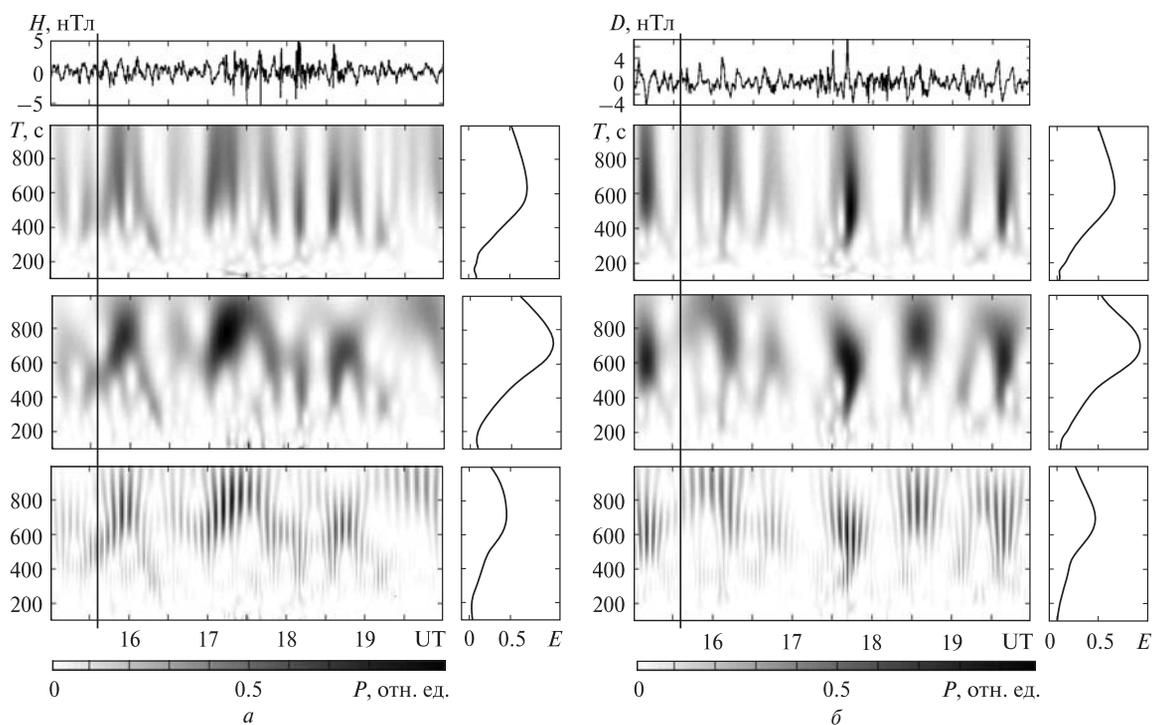


Рис. 8. То же, что на рис. 5, для 13 сентября 2004 г.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдения вариаций геомагнитного поля, сопровождавших прохождение СТ в характерные сезоны, показали, что в большинстве случаев (60–70 %) характер сигналов изменяется. Для оценки основных параметров ВВ был применен системный спектральный анализ при помощи ОПФ, АПФ и ВП. Оценены времена запаздываний, продолжительности и преобладающие периоды возможной реакции геомагнитного поля на прохождение СТ. Параметры возмущений в разные сезоны существенно не различались, т. е. характер наблюдаемых возмущений был в целом подобен. Эффекты представляли собой квазипериодический волновой процесс с преобладающими периодами примерно 9–11 мин, длительностью около 45–55 мин. Характерные возмущения, сопутствовавшие прохождению СТ, сопровождались в основном изменением периода преобладающих колебаний и увеличением (в ряде случаев подавлением) уровня магнитометрических сигналов в 1.5–2 раза.

В утренние часы наблюдались два типа возмущений с запаздываниями около 35 и 85 мин относительно момента восхода Солнца на высоте 200 км для первого и второго возмущений соответственно. Можно предположить, что они являются соседними периодами более продолжительного волнового процесса, т. е. волны, промодулировавшей квазипериодические вариации геомагнитного поля с периодом около 50 мин.

Для вечернего СТ имел место квазипериодический волновой процесс с запаздыванием около 75 мин относительно момента захода Солнца на уровне Земли.

Отметим, что наблюдаемые ВВ принципиально ничем не отличались от возмущений, связанных с источниками другой природы, и в ряде случаев (30–40 %) принятие решения о наличии эффектов, связанных с воздействием, было затруднено.

Для подтверждения наличия эффектов солнечного терминатора и получения более точных оценок основных параметров волновых процессов необходимо проведение статистической обработки большого массива данных. Также целе-

сообразной является аналогичная обработка для контрольных интервалов времени (невозмущенных СТ) и сравнение ее результатов с результатами для утренне-вечерних часов.

ВЫВОДЫ

1. Проведены исследования реакции геомагнитного поля на прохождение утреннего и вечернего СТ в характерные сезоны года. Установлено, что в большинстве случаев (60–70 %) наблюдалось изменение характера магнитометрических сигналов, сопутствовавшее прохождению СТ.

2. Оказалось, что эффекты солнечного терминатора в разные сезоны в целом подобны.

3. Проведенный системный спектральный анализ при помощи ОПФ, АПФ и ВП позволил оценить основные параметры характерных квазипериодических процессов. Обычно период преобладающих колебаний составлял 9–11 мин, их продолжительность — 45–55 мин и времена запаздывания — 30–40 и 80–90 мин для утреннего и 60–80 мин для вечернего терминатора.

4. Сопровождавшие прохождение СТ геомагнитные пульсации имели амплитуды 3–5 нТл и принципиально мало чем отличались от возмущений другой природы. Для уверенного выявления реакции геомагнитного поля на прохождение СТ требуется статистический анализ большого массива данных.

1. Антонова В. П., Гусейнов Ш. Ш., Дробжнев В. И., Зусманович А. Г. и др. Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1988. — **24**, № 2. — С. 134–143.
2. Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — **8**, № 2. — С. 143–162.
3. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрономия. — 2004. — **44**, № 4. — С. 518–534.
4. Гармаш К. П., Гокон А. М., Костров Л. С. и др. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различ-

- ной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере // Вестник Харьков. ун-та. Сер. Радиофизика и электроника. — 1998. — № 405. — С. 157–177.
5. *Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др.* Статистические характеристики флуктуации электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — **8**, № 2. — С. 163–180.
 6. *Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф., Шамота М. А.* Вариации геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам и полетам космических аппаратов // Космічна наука і технологія. — 2007. — **13**, № 7/6. — С. 87–98.
 7. *Гоков А. М., Гритчин А. И.* Влияние солнечного терминатора на среднеширотную D-область ионосферы и характеристики частично отраженных КВ-сигналов и радишумов // Геомагнетизм и аэрономия. — 1994. — **34**, № 2. — С. 169–172.
 8. *Госсард Э. Э., Хук У. Х.* Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978. — 532 с.
 9. *Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф.* Вейвлет-анализ в задачах физики геокосмоса // Космічна наука і технологія. — 2005. — **11**, № 5/6. — С. 22–29.
 10. *Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф.* Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2005. — **10**, № 10. — С. 39–49.
 11. *Сомсиков В. М.* Солнечный терминатор и динамика атмосферы. — Алма-Ата: Наука, 1983. — 192 с.
 12. *Сомсиков В. М.* Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэрономия. — 1991. — **31**, № 1. — С. 1–12.
 13. *Сомсиков В. М.* О генерации турбулентности атмосферы солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэрономия. — 1992. — **32**, № 3. — С. 55–59.
 14. *Сомсиков В. М., Троицкий Б. В.* Генерация возмущений в атмосфере при прохождении через нее солнечного терминатора // Геомагнетизм и аэрономия. — 1975. — **15**, № 5. — С. 856–860.
 15. *Черногор Л. Ф.* Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — **8**, № 1. — С. 59–106.
 16. *Черногор Л. Ф.* Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. — 2006. — **4**, № 12. — С. 655–697.
 17. *Черногор Л. Ф.* Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. — 2007. — **5**, № 4. — С. 55–97.
 18. *Черногор Л. Ф.* Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия. — 2008. — **48**, № 5. — С. 681–702.
 19. *Черногор Л. Ф.* Флуктуации геомагнитного поля вблизи г. Харькова, сопровождавшие старты ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрономия. — 2009. — **49**, № 3. — С. 403–415.
 20. *Черногор Л. Ф., Шамота М. А.* Волновые возмущения геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Плесецк // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 3. — С. 29–38.
 21. *Черногор Л. Ф., Шамота М. А.* Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов КНР // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 4. — С. 92–99.
 22. *Черногор Л. Ф., Шамота М. А.* Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов Мыс Канаверал и Куру // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 6. — С. 89–98.
 23. *Чернышева С. П., Шефтель В. М., Шаренская Э. Г.* Неоднородности электронной концентрации в межслоевой области ионосферы и внутренние гравитационные волны, генерируемые при движении в атмосфере солнечного терминатора // Геомагнетизм и аэрономия. — 1976. — **16**, № 5. — С. 809–814.
 24. *Afraimovich E. L.* First GPS-TEC evidence for the wave structure excited by the solar terminator // Earth Planets Space. — 2008. — **60**. — P. 895–900.

Надійшла до редакції 31.08.09

L. F. Chernogor, M. A. Shamota

GEOMAGNETIC PULSATIONS
ASSOCIATED WITH SOLAR
TERMINATORS NEAR KHARKIV CITY.
1. SPECTRAL ANALYSIS

The database of geomagnetic pulsations associated with the dawn and dusk terminators near Kharkiv city during the years 2002–2008 in the 1–1000 s period interval was collected and analyzed. The spectral analysis revealed quasi-periodic disturbances caused by the terminators and produced disturbance parameters. The disturbance periods turn out to be in the interval from 9 to 11 min with durations of 45–55 min and amplitudes of 3–5 nT. The response to the dawn and to the dusk terminators shows a delay of 30–40, 80–90 min and of 60–80 min, respectively.