УДК 550.388.533.951+523.868

## ВАРИАЦИИ УРОВНЯ И СПЕКТРА ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ИОНОСФЕРУ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА «СУРА»

 $Л. Ф. Черногор {}^{1}, B. Л. Фролов {}^{2,3} *$ 

<sup>1</sup> Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина <sup>2</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород; <sup>3</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Магнитометром-флюксметром вблизи г. Харьков (Украина) зарегистрированы апериодические и квазипериодические вариации уровня геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов 40÷1000 с, сопровождающие квазинепрерывное и периодическое воздействие на ионосферную плазму мощным радиоизлучением стенда «Сура» вблизи г. Нижний Новгород (Россия). Определены основные параметры апериодических и квазипериодических возмущений геомагнитного поля. Обсуждаются механизмы генерации и распространения обнаруженных возмущений.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением занимает видное место среди активных экспериментов в геокосмосе (см., например, [1–5]). Подавляющее число работ посвящено изучению эффектов, возникающих в пределах диаграммы направленности антенны мощного нагревного стенда. Особый интерес представляет исследование крупномасштабных (порядка 1000 км) возмущений в геокосмосе, вызванных воздействием мощным радиоизлучением на околоземную плазму [6–8].

Крупномасштабные возмущения по своей физической природе делятся на два класса. Первые из них — апериодические — вызваны увеличением концентрации электронов N на высотах областей ионосферы D и E, скорее всего, в результате высыпания энергичных (с энергией 40÷100 кэВ) электронов из внутреннего радиационного пояса Земли [7–13]. Вторые — квазипериодические — связаны с генерацией (усилением) и распространением акустико-гравитационных волн с периодом  $T \approx 1\div60$  мин в верхней атмосфере Земли и модуляцией электронной концентрации [7, 8, 14–20].

Модуляция концентрации нейтральных частиц и электронов, а также их температур приводит к модуляции проводимости ионосферы на высотах динамо-области. Это вызывает вариации плотности ионосферного тока и, в конечном итоге, вариации напряжённости геомагнитного поля [21–24]. Указанный механизм отличается от механизма генерации геомагнитных пульсаций за счёт эффекта Гетманцева, который, как известно, описывает генерацию сигналов на комбинационных частотах спектра сигнала мощной радиоволны и только в пределах диаграммы направленности антенны нагревного стенда (см., например, [3, 4]). Диапазоны частот (периодов) генерируемых волновых процессов значительно отличаются для этих двух механизмов.

Указанный нами механизм имеет место при запусках ракет, его проявление обнаруживается на расстояниях порядка 1000÷10000 км от траектории полёта ракеты [21–24]. При этом параметры геомагнитных пульсаций возмущаются в месте их наблюдения, а переносчиком служат волновые процессы, в том числе магнитогидродинамические (МГД) и акустико-гравитационные волны.

<sup>\*</sup> frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru

Дата	$AE_{\max}$ , нТл	$K_{\rm pmax}$	$\Sigma K_{\rm p}$	$a_{ m pmax},$ нТл	$A_{\rm p}$ , нТл	$D_{\rm st},$ нТл
26.08.2012	527	$^{3,7}$	18,7	22	11	$-6 \div +4$
27.08.2012	297	$_{3,0}$	10,7	15	6	$-8 \div +1$
28.08.2012	100	$1,\!3$	$5,\!3$	5	3	$-8\div 0$
29.08.2012	110	$1,\!3$	6,0	5	3	$-4 \div +3$
30.08.2012	88	1,0	5,0	4	3	$-1 \div +10$

Таблица 1. Параметры, описывающие состояние космической погоды

Целью данной работы является изложение и интерпретация результатов наблюдения вариаций амплитуды и спектра геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов 1÷1000 с, сопровождающих воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением стенда «Сура» в августе 2012 года.

С 1980-х годов в магнитной обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина проводился поиск вариаций геомагнитного поля, вызванных воздействием на ионосферу мощным радиоизлучением нагревных стендов вблизи г. Нижний Новгород (Россия) и г. Тромсё (Норвегия). Однако применяемые методики обнаружения и вычислительные средства не позволили убедительно выделить искомые эффекты. В одном из последних экспериментов [25] нам также не удалось доказать возможность генерации геомагнитных пульсаций при работе нагревного стенда «Сура», что, скорее всего, было связанно с невысокой эффективной мощностью его излучения  $PG \approx 40$  МВт. В рассматриваемых в данной работе экспериментах были зарегистрированы искусственные геомагнитные пульсации, когда мощность PG составляла 70÷150 МВт.

## 1. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Состояние космической погоды контролировалось по параметрам солнечного ветра (концентрации частиц  $n_{\rm sw}$ , скорости  $V_{\rm sw}$ , температуре  $T_{\rm sw}$  и давлению  $p_{\rm sw}$ ), компонентам  $B_y$  и  $B_z$  межпланетного магнитного поля, энергетической функции Акасофу  $\varepsilon_{\rm A}$ , а также индексам геомагнитной активности  $a_{\rm p}$ ,  $A_{\rm p}$ ,  $K_{\rm p}$  и  $D_{\rm st}$  (см. табл. 1).

26 августа 2012 года геокосмическая среда была слабо возмущена, наблюдалось незначительное возмущение межпланетного поля (до  $-(5\div6)$  нTл) и геомагнитного поля (индекс  $K_{\rm p\,max} < 4$ , см. рис. 1).

С 27 по 30 августа 2012 года космическая погода характеризовалась как спокойная. Параметры солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и геомагнитного поля слабо флуктуировали вокруг своих невозмущённых значений (см. табл. 1 и рис. 1).

Спокойная космическая погода способствовала выделению эффектов, вызванных воздействием мощного радиоизлучения.

### 2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Нагревный стенд «Сура»

Ионосферная плазма возмущалась стендом «Сура» с 28 по 31 августа 2012 года. Стенд излучал в диапазоне частот от 4785 до 6720 кГц с эффективной мощностью до 150 МВт. Для модификации ионосферы 28–30 августа использовались мощные радиоволны с обыкновенной поляризацией, 31 августа стенд излучал волны с необыкновенной поляризацией. Длительность импульсов



Рис. 1. Временны́е вариации параметров солнечного ветра с 26 по 31 августа 2012 года: радиальной скорости  $V_{\rm sw}$ , температуры  $T_{\rm sw}$  и концентрации  $n_{\rm sw}$ , рассчитанного динамического давления  $p_{\rm sw}$ , компонент межпланетного магнитного поля  $B_y$  (точки) и  $B_z$  (линия), рассчитанный поток энергии  $\varepsilon_{\rm A}$ , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли, индекса  $K_{\rm p}$  и индекса  $D_{\rm st}$ 

воздействия варьировалась от 5 до 30 мин, в ряде случаев использовался более длительный режим излучения. Для усиленной генерации искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта магнитного зенита диаграмма направленности стенда была всегда наклонена к югу

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов

2014

на 12°.

Стенд расположен около п. Васильсурск, вблизи г. Нижний Новгород (Россия), географические координаты 56,15° с. ш., 46,1° в. д.

#### 2.2. Магнитометр-флюксметр

Несерийный высокочувствительный магнитометр размещён в обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина (с. Граково, Чугуевский район, Харьковская обл., Украина), географические координаты 49,67° с. ш., 36,83° в. д., геомагнитные координаты +53,6°, 127°.

Магнитометр-флюксметр измеряет флуктуации геомагнитного поля. Его чувствительность определяется уровнем шумов, которые составляют  $0.5\div500$  пТл в диапазоне периодов  $T\approx 1\div \div1000$  с соответственно. Хорошо известно, что при увеличении периода T от единиц до 1000 с амплитуда естественных геомагнитных пульсаций увеличивается на несколько порядков.

Амплитудно-частотная характеристика магнитометра-флюксметра имеет максимум при периоде  $T \approx 5 \div 10$  с и спадает как  $T^{-1}$  при  $T \ge 300$  с. При восстановлении входного сигнала в рабочем диапазоне периодов с учётом амплитудно-частотной характеристики основной вклад в флуктуации геомагнитного поля дают колебания с периодами  $T \approx 300 \div 1000$  с. Добавим, что, в диапазоне периодов  $100 \div 1000$  с отклик магнитометра-флюксметра на геомагнитное возмущение примерно в  $2 \div 20$  раз слабее, чем на аналогичное возмущение в диапазоне  $T \approx 10$  с. Тем не менее этот отклик более чем на порядок превышает шум квантования использованного аналого-цифрового преобразователя и внутренние шумы активных датчиков магнитометра.

### 2.3. Ионозонд

Для общего контроля за ионосферой над п. Васильсурск использовался цифровой ионозонд. Кроме того, привлекалась информация, полученная на ионосферных станциях в г. Казань, г. Москва и г. Харьков.

Критическая частота ионосферы  $f_{0F_2}$  над нагревным стендом вела себя следующим образом во время экспериментов. С 07:00 до 09:30 UT частота  $f_{0F_2} \approx 4,1 \div 4,4$  МГц, примерно с 10:00 до 11:00 UT частота  $f_{0F_2} \approx 6,9 \div 7,3$  МГц. После полудня частота  $f_{0F_2}$  медленно уменьшалась. Около 18:00 UT частота  $f_{0F_2} \approx 6,6$  МГц. Как правило, частота волны накачки  $f < f_{0F_2}$ . В отдельные моменты времени (подробнее см. в работе [20]) выполнялось соотношение  $f \approx f_{0F_2}$ .

#### 3. МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

## 3.1. Первичная обработка

Выходной сигнал магнитометра в каждом из двух каналов соответствовал двум переменным горизонтальным компонентам ( $H_{\text{IOC}}$  и  $H_{3B}$ ) геомагнитного поля и с учётом калибровочной амплитудно-частотной характеристики магнитометра преобразовывался в флуктуации геомагнитного поля (в нанотеслах) в диапазоне периодов 1÷1000 с. Временные вариации затем подвергались дополнительной обработке, в частности, фильтрации в заданных поддиапазонах периодов.

## 3.2. Полосно-пропускающая фильтрация

Для выделения периодической реакции амплитуды флуктуаций геомагнитного поля на нагрев ионосферы применялась цифровая полосно-пропускающая фильтрация. При этом период искомой реакции был равен периоду T цикла нагрев/пауза (либо только продолжительности нагрева), а ширина фильтра во временной области определялась как  $\Delta T = k_T T$ , где коэффициент  $k_T = 1/3 \div 2/3$ . Такое значение  $k_T$  обеспечивает приемлемый компромисс между точностью оценки времени прихода сигнала реакции на нагрев ионосферы и точностью оценки среднего периода искомого сигнала. Например, при работе нагревного стенда «Сура» в режиме 1 мин — излучение, 1 мин — пауза (краткое обозначение [+1 мин; -1 мин]) средний период был T = 120 с, а диапазон периодов фильтра составлял 100÷140 с.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

#### 4.1. Апериодические вариации амплитуды геомагнитных пульсаций

Временны́е вариации компонент геомагнитного поля  $H_{3B}$  (проекция на магнитную параллель) и  $H_{\text{IOC}}$  (проекция на магнитный меридиан) в диапазоне периодов  $300 \div 1000$  с приведены на рис. 2 и 3 соответственно. В контрольные дни 26 и 27 августа 2012 года их амплитуда изменялась хаотически примерно от  $0,5 \div 1$  до  $1,5 \div 1,8$  нТл. Примерно таким же было поведение вариаций компонент  $H_{3B}$  и  $H_{\text{IOC}}$  и 31 августа 2012 года. Интервал времени с 06:00 до 11:00 UT последнего дня можно также рассматривать как контрольный.

28, 29 и 30 августа 2012 года ионосферная плазма возмущалась мощным радиоизлучением. Характер временны́х вариаций внешне практически не изменился, однако после включения стенда «Сура» возникли всплески амплитуд вариаций обеих компонент.

28 августа 2012 года стенд излучал на частоте 4785 кГц с мощностью  $PG \approx 75$  МВт в режиме [+30 мин; -30 мин] в период 06:15÷10:15 UT. В зависимости компоненты  $H_{3B}$  отмечались всплески в периоды 06:25÷06:35 UT, 07:25÷07:55 UT, 08:10÷08:20 UT и 09:35÷10:00 UT (см. рис. 2). Компонента  $H_{\text{HOC}}$  заметно увеличивалась лишь в интервале времени 09:35÷10:00 UT (см. рис. 3).

29 августа 2012 года стенд «Сура» излучал на частоте 4785 кГц с мощностью PG = 80 МГц в режиме [+30 мин; -30 мин] в период 06:00÷10:00 UT, а с 10:45 до 13:00 UT в режиме [+15 мин; -15 мин] на частоте f = 6720 кГц с мощностью  $PG \approx 150$  МВт. Заметные всплески компоненты  $H_{3B}$  наблюдались в интервалах времени 06:15÷06:25 UT, 07:10÷07:40 UT, 08:20÷ ÷08:40 UT, 09:10÷09:30 UT и 10:50÷10:55 UT (см. рис. 2). Всплески компоненты  $H_{\text{HOC}}$  отмечались примерно в те же интервалы времени, а именно в 06:10÷06:20 UT, 07:10÷07:30 UT и 09:10÷09:25 UT (см. рис. 3).

30 августа 2012 года нагревный стенд излучал на частоте 4785 кГц с мощностью  $PG \approx$  $\approx 70$  МВт в режиме [+30 мин; -30 мин] в период 07:00÷10:00 UT, а с 10:00 до 11:15 UT в режиме [+5 мин, -5 мин] на частоте f = 6720 кГц с мощностью  $PG \approx 65$  МВт. Уровень компоненты  $H_{3B}$  заметно увеличивался в интервалах времени 07:15÷07:25 UT, 07:55÷08:20 UT, 09:00÷09:20 UT и 09:40÷10:15 UT (см. рис. 2). Некоторое увеличение амплитуды компоненты  $H_{\text{HOC}}$  регистрировалось в интервалах времени 07:10÷07:30 UT, 08:45÷08:55 UT и 10:30÷10:55 UT (см. рис. 3).



Рис. 2. Временны́е вариации компоненты  $H_{3B}$  геомагнитного поля в диапазоне периодов 300÷1000 с (5÷17 мин). Полосы на осях времени обозначают периоды работы стенда «Сура»



Рис. 3. Временны́е вариации компоненты  $H_{\text{HOC}}$  геомагнитного поля в диапазоне периодов 300÷1000 с (5÷17 мин). Полосы на осях времени обозначают периоды работы стенда «Сура»

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов



Рис. 4. Временны́е вариации компонент геомагнитного поля 31 августа 2012 года в диапазонах периодов 40÷80 (*a*, *b*) и 100÷140 с (*b*, *b*). Полосы на осях времени обозначают серию 1-минутных импульсов стенда «Сура» в течение 1 ч

# 4.2. Периодические вариации уровня геомагнитных пульсаций в диапазоне МГД волн

31 августа 2012 года стенд «Сура» излучал радиоволну необыкновенной поляризации на частоте f = 4785 кГц с мощностью  $PG \approx 85$  МВт в режиме [+1 мин, -1 мин]. Диаграмма направленности антенны, как и в остальные дни, имела наклон 12° на юг. Ожидалось, что может возникнуть усиление геомагнитных пульсаций с периодами 1 и 2 мин.

Временны́е вариации уровня компонент  $H_{3B}$  и  $H_{\text{HOC}}$  в диапазоне периодов 40÷80 и 100÷140 с показаны на рис. 4. Из рис. 4 видно, что примерно через  $\Delta t \approx 8\div10$  мин после включения стенда в 10:00 UT амплитуда компоненты  $H_{3B}$  увеличилась в 1,3÷1,5 раза, продолжительность  $\Delta T$  увеличения была примерно равна продолжительности серии импульсов (около 60 мин). Амплитуда компоненты  $H_{\text{HOC}}$  заметно (в 1,3÷1,6 раза) увеличилась лишь в диапазоне периодов 40÷80 с. При этом задержка  $\Delta t \approx 9\div10$  мин, а продолжительность увеличения  $\Delta T \approx 60$  мин.



Рис. 5. Временны́е вариации компоненты H<sub>3B</sub> геомагнитного поля в диапазоне периодов 480÷720 с (8÷12 мин). Полоски на осях времени обозначают выделенные периоды работы стенда «Сура»

# 4.3. Периодические вариации амплитуды геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов акустико-гравитационных волн

28 августа 2012 года с 13:00 до 13:30 UT нагревный стенд излучал непрерывно на частоте 4785 кГц с мощностью  $PG \approx 75$  МВт; в интервале времени 13:45÷15:55 UT — на частоте f = 5828 кГц с мощностью  $PG \approx 110$  МВт в режиме [+10 мин; -10 мин]; с 16:40 до 18:30 UT — на частоте f = 4785 кГц с мощностью  $PG \approx 75$  МВт в режиме [+10 мин; -10 мин]; а с 18:30 до 20:30 UT — в режиме [+15 мин; -15 мин].

Целью эксперимента в этот и последующие дни был поиск усиления амплитуды геомагнитных пульсаций вблизи периодов 10, 20 и 15 мин. Периоды 30 мин и больше находятся вне пределов возможных измерений с помощью используемого магнитометра-флюксметра.

Временны́е вариации компоненты  $H_{3B}$  показаны на рис. 5. Видно, что некоторое увеличение амплитуды пульсаций имело место в интервалах времени  $13:15\div13:50$  UT,  $14:00\div14:20$  UT;



Рис. 6. Временны́е вариации компоненты  $H_{\text{HOC}}$  геомагнитного поля в диапазоне периодов 480÷720 с (8÷12 мин). Полоски на осях времени обозначают выделенные периоды работы стенда «Сура»

14:40÷15:05 UT; 16:05÷16:40 UT и 18:30÷19:00 UT. Усиление амплитуды компоненты  $H_{\text{ЮС}}$  на-блюдалось с 13:35 до 14:10 UT, с 14:30 до 16:10 UT, с 17:15 до 17:40 UT и с 18:15 до 19:20 UT (см. рис. 6).

29 августа 2012 года стенд «Сура» излучал на частоте 5 828 кГц с мощностью  $PG \approx 130$  МВт в режиме [+30 мин; -30 мин] в интервале времени 14:15÷15:45 UT, в режиме [+10 мин; -10 мин] — в интервале 16:05÷18:25 UT и в режиме [+15 мин; -15 мин] — с 18:30 до 20:30 UT.

Амплитуда пульсации компоненты  $H_{3B}$  существенно увеличилась в интервале времени 16:00÷16:30 UT (см. рис. 5). В остальные моменты времени амплитуда в диапазоне периодов 8÷12 мин изменилась незначительно. Существенные вариации компоненты  $H_{\text{HOC}}$  имели место с 15:00 до 16:00 UT, несколько меньшие вариации наблюдались с 16:40 до 18:45 UT.

30 августа 2012 года с 07:00 до 10:00 UT стенд излучал на частоте 4785 кГц с мощностью  $PG \approx 40$  MBт в режиме [+30 мин; -30 мин]. В интервале времени 10:00÷11:15 UT стенд излучал

на частоте 6 720 кГц с мощностью  $PG \approx 65$  МВт в режиме [+5 мин; -5 мин], в интервале времени 15:20÷16:40 UT — на частоте 5 828 кГц с мощностью  $PG \approx 45$  МВт в режиме [+20 мин; -10 мин] и в интервале времени 17:00÷18:25 UT — на частоте 5 828 кГц с мощностью  $PG \approx 45$  МВт в режиме [+5 мин; -5 мин].

Для поиска возможных реакций геомагнитного поля на воздействие мощного радиоизлучения в режиме [+5 мин; -5 мин] выполнена полосно-пропускающая фильтрация в диапазоне периодов 8÷12 мин (см. рис. 5 и 6).

Из рис. 5 видно, что 30 августа 2012 года амплитуда компоненты  $H_{3B}$  заметно увеличилась в интервалах времени 10:10÷10:30 UT, 10:40÷11:30 UT, 11:40÷12:40 UT и 17:40÷18:20 UT. Как следует из рис. 6, определённый рост амплитуды пульсаций компоненты  $H_{\text{HOC}}$  имел место с 09:00 до 09:40 UT, с 10:20 до 11:20 UT, с 12:00 до 13:00 UT, с 16:10 до 17:40 UT и с 18:30 до 19:30 UT.

Перейдём к анализу возможности генерации пульсаций с периодом  $T \approx 12 \div 18$  мин при работе нагревного стенда в режиме [+15 мин; -15 мин]. В таком режиме стенд излучал 28 августа 2012 года в интервале времени 18:30÷20:30 UT (f = 4.785 кГц,  $PG \approx 80$  MBr), 29 августа с 10:45 до 13:00 UT (f = 6.720 кГц,  $PG \approx 150$  MBr) и с 18:30 до 20:30 UT (f = 5.828 кГц,  $PG \approx 130$  MBr).

Как видно из рис. 7, 28 августа 2012 года амплитуда компоненты  $H_{3B}$  заметно увеличилась в интервалах времени 18:10÷19:10 UT, 19:15÷20:10 UT, а 29 августа — с 11:45 до 13:10 UT, с 19:10 до 19:45 UT и с 20:45 до 21:30 UT.

Из рис. 8 следует, что ощутимое увеличение амплитуды пульсаций компоненты  $H_{\text{HOC}}$  28 августа 2012 года наблюдалось в интервалах времени 18:40÷19:20 UT и 20:50÷21:50 UT, а 29 августа — с 11:20 до 13:10 UT, с 19:10 до 20:10 UT и с 20:30 до 22:00 UT.

## 5. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

#### 5.1. Механизмы генерации магнитных возмущений

Магнитометры регистрируют магнитную компоненту электромагнитных или МГД волн. Таким волнам соответствовали возмущения со временем запаздывания  $\Delta t_1 \approx 8\div10$  мин. Чтобы понять, какова природа возмущений с временами запаздывания  $\Delta t_2 \approx 35\div45$  мин, следует учесть, что воздействие мощным радиоизлучением на ионосферу приводит к генерации акустикогравитационных волн — волновых возмущений, захваченных в термосферный волновод. Спектр этих волн в реальной среде, учитывающей стратификацию температуры атмосферы по высоте, является дискретным (см., например, [26]). Периоды преобладающих волн, как показывают оценки, находятся в пределах 6÷15 мин. Для наблюдения волн с такими периодами оказывается удобным используемый в наших измерениях магнитометр-флюксметр. Наименьшее затухание имеют волны, распространяющиеся в волноводе. Эти волны без заметного ослабления преодолевают расстояния в несколько тысяч километров. Они имеют максимальную амплитуду на высоте около 150 км, т. е. на верхней границе динамо-области ионосферы.

Акустико-гравитационные волны с периодом T модулируют параметры атмосферы (концентрацию нейтральных частиц  $N_n$  и их температуру  $T_n$ ) и ионосферы (концентрацию электронов  $N_e$  и ионов  $N_i$ , их температуры  $T_e$  и  $T_i$ , частоты соударений электронов  $\nu_{en}$  и ионов  $\nu_{in}$  с нейтральными частицами и др.). В итоге оказываются промодулированными компоненты тензора проводимости  $\sigma$  ионосферной плазмы. При наличии внешнего (ионосферно-магнитосферного происхождения) электрического поля  $\mathbf{E}_0$  модуляция тензора  $\sigma$  приводит к модуляции плотности ионосферных токов с амплитудой согласно работам [21–23]

$$\Delta \mathbf{j} = \Delta \boldsymbol{\sigma} \, \mathbf{E}_0$$

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов



Рис. 7. Временны́е вариации компоненты  $H_{3B}$  геомагнитного поля в диапазоне периодов 720÷1080 с (12÷18 мин). Полосы на осях времени обозначают выделенные периоды работы стенда «Сура»



Рис. 8. Временны́е вариации компоненты  $H_{\text{HOC}}$  геомагнитного поля в диапазоне периодов 720÷1080 с (12÷18 мин). Полосы на осях времени обозначают выделенные периоды работы стенда «Сура»

С другой стороны, движение нейтральных частиц с некоторой скоростью  $\mathbf{v}_n$  в акустикогравитационной волне благодаря соударениям приводит к движению ионов и электронов (со скоростями  $\mathbf{v}_i$  и  $\mathbf{v}_e$  соответственно). Возникает сторонний ток с плотностью  $\mathbf{j}_1 = eN(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_e)$ , где e — элементарный заряд. Появление токов с плотностями  $\Delta \mathbf{j}$  и  $\mathbf{j}_1$  обусловливает генерацию электромагнитного поля с индукцией  $\mathbf{B}$ , которая вычисляется согласно уравнению Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \left( \Delta \mathbf{j} + \mathbf{j}_1 \right), \tag{1}$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная. В уравнении (1) не учитывается ток смещения, которым можно пренебречь для периодов волн  $T \approx 1 \div 10$  мин.

Выберем направление оси z вдоль геомагнитного поля **B**, ось x ориентируем из места наблюдения вдоль магнитной параллели на место генерации акустико-гравитационной волны (вблизи г. Нижний Новгород, который расположен примерно на той же широте, что и г. Харьков), ось yдополняет систему координат до правой. При этом из уравнения (1) следует, что

$$-\frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu_0 \left(\Delta j_x + j_{1x}\right), \qquad \frac{\partial B_x}{\partial z} = \mu_0 \left(\Delta j_y + j_{1y}\right). \tag{2}$$

В выражениях (2) также учтено, что поле в основном неоднородно по координате z. Поле изменяется по координате z на характерном масштабе порядка нескольких десятков километров, что близко к толщине динамо-области, занимающей диапазон высот  $100\div150$  км, масштаб изменения по остальным координатам — порядка длины волны  $\lambda = v_{\rm ph}T \approx 300\div1000$  км. Здесь  $v_{\rm ph}$  — фазовая скорость волны, которая близка к скорости звука в атмосфере  $c_{\rm s} \approx 0.3\div0.8$  км/с.

### 5.2. Модуляция ионосферных токов

Применяя известный (см., например, монографию [27]) подход, нетрудно вычислить плотность генерируемого электрического тока в невозмущённой ионосфере под действием атмосферного ветра:

$$\mathbf{j}_0 = eN\left(\mathbf{v}_{\mathrm{i}} - \mathbf{v}_{\mathrm{e}}\right). \tag{3}$$

Скорости ионов и электронов находятся из квазистационарных уравнений

$$\nu_{\rm in} \left( \mathbf{v}_{\rm i} - \mathbf{v}_{\rm n} \right) = \frac{e}{m_{\rm i}} \left[ \mathbf{v}_{\rm i}, \mathbf{B}_0 \right],\tag{4}$$

$$\nu_{\rm en} \left( \mathbf{v}_{\rm e} - \mathbf{v}_{\rm n} \right) = -\frac{e}{m_{\rm e}} \left[ \mathbf{v}_{\rm e}, \mathbf{B}_0 \right].$$
(5)

Здесь **B**<sub>0</sub> — индукция невозмущённого геомагнитного поля,  $m_{\rm i}$  и  $m_{\rm e}$  — массы ионов и электронов соответственно. Условие квазистационарности имеет вид  $2\pi/T \ll \nu_{\rm in}, \nu_{\rm en}, \omega_{\rm Bi}, \omega_{\rm Be}$ , где  $\omega_{\rm Bi}$  и  $\omega_{\rm Be}$  — гирочастоты ионов и электронов.

Для западного (или восточного) ветра решения уравнений (4) и (5) имеют вид

$$v_{ix} = \frac{v_n}{1 + \Omega_i^2}, \qquad v_{iy} = -\frac{v_n \Omega_i}{1 + \Omega_i^2}, \qquad v_{ex} = \frac{v_n}{1 + \Omega_e^2}, \qquad v_{ey} = \frac{v_n \Omega_e}{1 + \Omega_e^2},$$

где  $\Omega_{\rm i} = \omega_{\rm Bi}/\nu_{\rm in}$ ,  $\Omega_{\rm e} = \omega_{\rm Be}/\nu_{\rm en}$ . При северном (или южном) ветре проекции скоростей  $\mathbf{v}_{\rm i}$  и  $\mathbf{v}_{\rm e}$  на оси x и y меняются местами. Далее учтём, что в динамо-области ионосферы гирочастоты  $\omega_{\rm Bi} \approx \approx 180 \text{ c}^{-1}$ ,  $\omega_{\rm Be} \approx 8.8 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ , частоты столкновений  $\nu_{\rm in} \approx 10^4 \div 10^2 \text{ c}^{-1}$ ,  $\nu_{\rm en} \approx 10^5 \div 10^3 \text{ c}^{-1}$  для

высот  $z \approx 100$  и 150 км соответственно. Тогда параметры  $\Omega_i^2 \ll 1$ ,  $\Omega_e^2 \gg 1$ , компоненты скоростей  $v_{ix} \gg v_{ex}$ ,  $v_{iy} \gg v_{ey}$ . Таким образом, компоненты тока

$$j_{0x} \approx eNv_{ix} \approx eNv_n, \qquad j_{0y} \approx eNv_{iy} \approx eNv_n\Omega_i.$$
 (6)

Поскольку электроны замагничены, ионосферный ток в динамо-области определяется в основном движением ионов, причём почти везде (кроме верхней границы динамо-области) компонента тока  $j_{0x} \gg j_{0y}$ . У этой границы отношение  $\Omega_i \approx 1$  и токи

$$j_{0x} \approx eNv_{\rm n}/2, \qquad j_{0y} \approx -eNv_{\rm n}/2.$$
 (7)

Характерная плотность тока в ионосферной динамо-области  $j_c = eNv_n$ , где скорость  $v_n$  определяется скоростью нейтрального ветра  $v_w$ . При скорости ветра  $v_w = 100 \text{ м/c}$  и электронной концентрации  $N = 2 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}$  и  $2 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$  для высоты  $z \approx 150$  км в ночное и дневное время соответственно имеем  $j_c \approx 3.2 \cdot 10^{-7} \text{ A/m}^2$  и  $3.2 \cdot 10^{-6} \text{ A/m}^2$ .

Хорошо известно (см., например, монографию [27]), что в динамо-области ионосферы проводимость плазмы определяется её педерсеновской  $\sigma_{\rm P}$  и холловской  $\sigma_{\rm H}$  составляющими. Важно, что вклад в первую дают в основном ионы, а во вторую — электроны, т. е.

$$\sigma_{\rm P} \approx \sigma_{\rm Pi} = \varepsilon_0 \, \frac{\omega_{\rm pi}^2 \nu_{\rm in}}{\omega_{\rm Bi}^2 + \nu_{\rm in}^2} \,, \qquad \sigma_{\rm H} \approx \sigma_{\rm He} = -\varepsilon_0 \, \frac{\omega_{\rm pe}^2}{\omega_{\rm Be}} \,.$$

Здесь  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\omega_{\rm pi}$  и  $\omega_{\rm pe}$  — плазменные частоты ионов и электронов соответственно.

Малым изменениям концентрации электронов ( $\Delta N \ll N$ ), температуры ионов ( $\Delta T_i \ll T_i$ ) и концентрации нейтральных частиц ( $\Delta N_n \ll N_n$ ) в поле акустико-гравитационной волны соответствуют малые изменения проводимостей

$$\Delta \sigma_{\rm P} = \sigma_{\rm P} \delta_{\sigma_{\rm P}} = \sigma_{\rm P} \left( \delta_N - \frac{1+\gamma}{2} \, \delta_{N_{\rm n}} \right), \qquad \Delta \sigma_{\rm H} = \sigma_{\rm H} \delta_{\sigma_{\rm H}} = \sigma_{\rm H} \delta_N, \tag{8}$$

где  $\delta_{\sigma_{\rm P}}$  и  $\delta_{\sigma_{\rm H}}$  — относительные изменения педерсеновской и холловской проводимостей соответственно,  $\delta_N = \Delta N/N$ ,  $\delta_{N_{\rm n}} = \Delta N_{\rm n}/N_{\rm n}$ ,  $\gamma$  — отношение удельных теплоёмкостей нейтрального газа при постоянном давлении и объёме соответственно. В выражениях (8) учтено, что частота столкновений  $\nu_{\rm in} \propto N_{\rm n} v_{\rm n} \propto N_{\rm n} T_{\rm n}^{1/2}$ , относительное изменение температуры нейтрального газа  $\Delta T_{\rm n}/T_{\rm n} = (\gamma - 1) \delta_{N_{\rm n}}$ .

Изменение электронной концентрации  $\delta_N$  можно оценить из результатов работы [28]:

$$\delta_N = \frac{k_z v_z}{(\omega_N^2 + \omega^2)^{1/2}} \,,$$

где  $\omega_N = t_n^{-1} = 2\alpha_r N$ ,  $t_n$  — время установления концентрации N за счёт рекомбинации,  $\alpha_r$  — коэффициент рекомбинации электронов с молекулярными ионами,  $k_z$  — вертикальная составляющая волнового вектора **k** акустико-гравитационной волны,  $v_z$  — вертикальная составляющая скорости частиц в волне.

Таким образом, для расчёта возмущений компонент тензора проводимости необходимо знать величину  $\delta_N$  или компоненты  $k_z$  и  $v_z$ . Строгий расчёт скорости  $v_z$  является сложной и самостоятельной задачей, выходящей за рамки данной статьи. Такая задача решалась, например, в работах [26, 29].

Таблица 2. Параметры среды при  $z \approx 150$  км и геомагнитный эффект, обусловленный модуляцией ионосферного тока (возмущения  $\Delta B_x$ ,  $\Delta B_y$ ) и увлечением волной заряженных частиц (возмущения  $\Delta B_{xv}$ ,  $\Delta B_{yv}$ )

Время	N,	$j_{ m c},$	$\delta_{N_{\mathrm{n}}},$	$\delta_N,$	$\delta_{\sigma P},$	$\delta_{\sigma H},$	$\Delta z_x,$	$\Delta z_y,$	$\Delta B_x,$	$\Delta B_y,$	$\Delta B_{xv},$	$\Delta B_{yv},$
суток	${}_{\rm M}^{-3}$	мк $A/m^2$	%	%	%	%	KM	KM	нТл	нТл	нТл	нТл
День	$2 \times$	3,20	5	0,33	-5,7	0,33	50	25	-0,09	3,1	-5,0	20,3
	$\times 10^{11}$											
Ночь	$2 \times$	0,32	5	3,30	-2,7	$3,\!30$	50	25	-0,09	0,3	-0,5	$^{2,0}$
	$\times 10^{10}$											

Детальные численные расчёты [26, 29] приводят к скоростям  $v_z$  порядка нескольких м/с на высотах *E*-области ионосферы. Поэтому в дальнейших расчётах мы будем ориентироваться на значение  $v_z = 1$  м/с.

Для оценки отклонения  $\delta_N$  положим, что на высоте z = 150 км коэффициент рекомбинации  $\alpha_r \approx 3.5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{c}^{-1}$ , скорость звука  $c_s \approx 500 \text{ м/c}$ , амплитуда волны  $\delta_{N_n} = 0.01 \div 0.02$ . При скорости  $v_z = 1 \text{ м/c}$ , волновом числе  $k \approx 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ , проекции  $k_z \approx 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$  для периода T = 1000 с обратное время  $\omega_N = 0.14 \text{ c}^{-1}$  и  $0.014 \text{ c}^{-1}$  для дня и ночи соответственно. Видно, что обычно вблизи высоты 150 км квадрат частоты  $\omega^2 \ll \omega_N^2$ . Тогда отклонение  $\delta_N \approx k_z v_z/\omega_N$  составляет  $1.6 \cdot 10^{-3}$  и  $0.8 \cdot 10^{-2}$  днём и ночью соответственно. При этом отклонение  $\delta_{\sigma_P}$  составляет  $-1.6 \cdot 10^{-2}$  и  $-0.8 \cdot 10^{-2}$ , а  $\delta_{\sigma_H} = 1.6 \cdot 10^{-3}$  и  $0.8 \cdot 10^{-2}$ .

Из соотношений (2) при токе  $j_1 = 0$  следуют выражения для амплитуд возмущений компонент геомагнитного поля

$$\Delta B_y \approx \mu_0 \int \Delta j_x \, \mathrm{d}z \approx \mu_0 \, \Delta j_x \, \Delta z_x, \qquad \Delta B_x \approx \mu_0 \int \Delta j_y \, \mathrm{d}z \approx \mu_0 \, \Delta j_y \, \Delta z_y. \tag{9}$$

Здесь учтено, что вклад в возмущение  $\Delta B_y$  даёт вся динамо-область, где толщина  $\Delta z_x \approx 50$  км, а в возмущение  $\Delta B_x$  — лишь область высот вблизи верхней границы динамо-области ( $z \approx 150$  км), где толщина  $\Delta z_y \approx 25$  км. В первом случае величина  $\Delta j_x$  представляет собой изменение педер-сеновского тока, т. е.

$$\Delta j_x \approx \delta_{\sigma_{\rm P}} j_{\rm c},\tag{10}$$

во втором случае величина  $\Delta j_y$  — изменение холловского тока, т. е.

$$\Delta j_y \approx \delta_{\sigma_{\rm H}} j_{0y} \approx -\frac{1}{2} \,\delta_{\sigma_{\rm H}} j_{\rm c}.\tag{11}$$

Подставляя выражения (10) и (11) в формулы (9), получим

$$\Delta B_y \approx \mu_0 \delta_{\sigma_{\rm P}} j_{\rm c} \, \Delta z_x, \qquad \Delta B_x \approx -\frac{1}{2} \, \mu_0 \delta_{\sigma_{\rm H}} j_{\rm c} \, \Delta z_y. \tag{12}$$

Результаты оценок геомагнитного эффекта по формулам (12) приведены в табл. 2.

#### 5.3. Увлечение заряженных частиц волной

Составляющие плотности стороннего тока также описываются соотношениями, подобными выражениям(6) и (7), где скорость нейтральных частиц  $v_n$  определяется скоростью частиц в волне v. Выражения для возмущений поля  $\Delta B_y$  и  $\Delta B_x$  подобны соотношениям (9), (12):

$$\Delta B_y \approx \mu_0 j_{1x} \,\Delta z_x, \qquad \Delta B_x \approx \mu_0 j_{1y} \,\Delta z_y, \tag{13}$$

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов

где в динамо-области ионосферы, как и в соотношениях (6), токи

$$j_{1x} \approx eNv, \qquad j_{1y} \approx -eNv\Omega_{\rm i}.$$
 (14)

На верхней границе динамо-области (высот<br/>а $z\approx 150~{\rm км})$ аналогично выражению (7) компоненты тока

$$j_{1x} \approx eNv/2, \qquad j_{1y} \approx -eNv/2.$$
 (15)

С учётом соотношений (14) и (15) из формулы (13) получаем возмущения поля

$$\Delta B_{yv} \approx \mu_0 e N v \, \Delta z_x, \qquad \Delta B_{xv} \approx -\frac{1}{2} \, \mu_0 e N v \, \Delta z_y.$$

Результаты оценок геомагнитного эффекта для скорости частиц в волне v = 10 м/с приведены в табл. 2, откуда видно, что возмущения компонент геомагнитного поля на высотах ионосферы достигают  $0,1\div10$  нТл. При этом на уровне поверхности Земли они не превышают  $0,1\div1$  нТл.

Заметим, что описанный выше механизм подобен механизму из работ [30, 31], где также рассматривается модуляция проводимости ионосферы и авроральной элетроструи. Результаты наблюдений геомагнитных пульсаций, генерируемых вблизи места расположения нагревного стенда (г. Тромсё, Норвегия) приведены в работах [32–34]. В то же время, наш механизм существенно отличается от механизма генерации геомагнитных флуктуаций непосредственно в пределах диаграммы направленности антенны нагревного стенда, связанного с развитием нитеобразующей неустойчивости (filamentation instability, данный механизм рассматривался в работах [35–38]).

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

Наложение реакций от множества источников обуславливает хаотический характер вариаций амплитуд компонент  $H_{3B}$  и  $H_{\text{IOC}}$  геомагнитного поля. Тем не менее в таком поведении систематически обнаруживаются достаточно регулярные колебания. Как известно, основным источником геомагнитных пульсаций в исследуемом диапазоне периодов являются магнитосферные процессы [39–42]. В меньшей степени на формирование пульсаций влияют вспышки на Солнце [30], ионосферные процессы [43], сейсмические процессы [43, 44], мощные взрывы [43, 44], старты и полёты крупных космических аппаратов [21–24], падение крупных космических тел [45] и т. п. В работе [32] описаны результаты наблюдений геомагнитных пульсаций Рс5, генерируемых в пределах диаграммы направленности антенны нагревного стенда.

На фоне перечисленных источников весьма трудно выделить реакцию геомагнитных пульсаций на воздействие мощным радиоизлучением на расстоянии порядка 1000 км. При выделении искомой реакции анализировались изменения характера и спектра временны́х вариаций амплитуды геомагнитных пульсаций, следовавшие за периодическим включением радиоизлучения мощного стенда. Эти изменения должны были отличаться от изменений, наблюдавшихся до первого включения нагревного стенда, а также в то же самое время суток в контрольные дни.

#### 6.1. Апериодические вариации амплитуды геомагнитных пульсаций

В 11 сеансах включения мощного стенда в режиме [+30 мин; -30 мин] апериодические всплески амплитуды компоненты  $H_{3B}$  геомагнитного поля наблюдались 11 раз, причём в семи случаях всплески запаздывали на время  $\Delta t \approx 10 \div 20$  мин, в двух на  $\Delta t \approx 0$  мин и ещё в двух на  $\Delta t \approx -5$  мин (всплески возникали до включения стенда). Если принимать во внимание всплески со

временем запаздывания  $\Delta t \approx 0$ ÷20 мин, среднее значение  $\langle \Delta t \rangle$  составляет 9,4±1,7 мин. Длительность всплесков  $\Delta T$  при этом изменялась от 20 до 45 мин, среднее значение  $\langle \Delta T \rangle = 22,8\pm3,9$  мин. Заметные вариации амплитуды переменной компоненты  $H_{\rm HOC}$  возникали в 5 случаях из 11. При этом возмущения запаздывали от 10 до 20 мин ( $\langle \Delta t \rangle \approx 12,0\pm3,0$  мин), а их продолжительность составляла от 10 до 20 мин ( $\langle \Delta T \rangle \approx 18,0\pm6,0$  мин). Видно, что средние времена запаздывания возмущений и их продолжительности для компонент  $H_{\rm 3B}$  и  $H_{\rm HOC}$  оказались близкими.

Какова природа апериодических возмущений? Вариации геомагнитного поля вызваны изменениями плотности ионосферных токов в результате изменения проводимости ионосферы. Последняя могла изменяться за счёт увеличения электронной концентрации N на высотах динамообласти. К увеличению концентрации N, скорее всего, приводило высыпание частиц из внутреннего радиационного пояса. В пользу этого предположения свидетельствуют синхронные наблюдения [12, 13], выполненные на сети ионозондов в эти же дни. Подобный механизм взаимодействия подсистем в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера, по-видимому, имел место и в экспериментах [11].

Таким образом, есть основания считать, что апериодические вариации амплитуды геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов  $300 \div 1\,000$  с имеют искусственное происхождение и обусловлены ударным воздействием на подсистемы общей системы Земля—атмосфера—ионосфера магнитосфера. Для срабатывания всей цепочки подсистем требуется продолжительность воздействия мощного радиоизлучения не менее  $10 \div 20$  мин. При более коротких импульсах может проявляться «эффект накопления» [6–8, 12, 13]. Скорее всего, этот эффект наблюдался в компоненте  $H_{3B}$  30 августа 2012 года в интервале времени  $10:30 \div 10:55$  UT. При этом режим работы стенда «Сура» был [+5 мин; -5 мин], а время запаздывания возмущений  $\Delta t \approx 30$  мин.

# 6.2. Периодические вариации амплитуды геомагнитных пульсаций на частотах МГД волн

Если вариации амплитуды геомагнитных пульсаций в диапазонах периодов 40÷80 и 100÷140 с связаны с излучением стенда в режиме [+1 мин; -1 мин], то время запаздывания генерирующих их возмущений составило бы 8÷10 мин. При распространении волны по близкой к прямолинейной трассе для её скорости имеем очевидное соотношение

$$v = \frac{R}{\Delta t - \Delta t_0},\tag{16}$$

где R — расстояние между местами генерации и регистрации волны,  $\Delta t_0$  — длительность включения источника волн.

Для расстояния Васильсурск—Граково R = 960 км и мгновенного включения источника ( $\Delta t_0 \approx 0$  мин) получим скорость  $v \approx 1,6\div 2,0$  км/с. В принципе, такую скорость имеют медленные МГД волны [22, 34]. Скорость этих волн даётся следующим соотношением согласно [22, 34]:

$$v_{\rm As} = v_{\rm A} s^{1/2}, \qquad v_{\rm A} = \frac{B_0}{\sqrt{\mu_0 N M_{\rm i}}},$$
(17)

где  $v_{\rm A}$  — альвеновская скорость,  $s = N/N_{\rm n}$  — степень ионизации плазмы,  $N_{\rm n}$  — концентрация нейтральных частиц.

На высотах  $z = 100 \div 150$  км степень ионизации *s* равна  $10^{-8} \div 10^{-6}$  и  $10^{-9} \div 10^{-7}$  в дневное и ночное время соответственно. При этом скорость  $v_{\rm As} = 0,1 \div 1,0$  км/с.

Однако более естественно считать, что длительность включения  $\Delta t_0 \approx \Delta t \approx 8 \div 10$  мин (см. подраздел 6.1). При этом скорость распространения возмущений из соотношения (16) не может быть определена. По-видимому, скорость v равна скорости МГД волн в ионосфере (около 1000 км/с). Действительно, из выражения (17) следует, что  $v_A \approx 400 \div 120$  км/с при электронной концентрации  $N = 10^{10} \div 10^{11}$  м<sup>-3</sup>, средней массе ионов  $M_i = 4,6 \cdot 10^{-26}$  кг и магнитном поле  $B_0 \approx 3 \cdot 10^{-5}$  нТл.

# 6.3. Периодические вариации амплитуды геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов акустико-гравитационных волн

28 августа 2012 года амплитуда компоненты  $H_{3B}$  увеличилась в интервалах времени 13:15÷ ÷13:50 и 14:00÷14:20 UT (см. рис. 5) — через промежуток  $\Delta t \approx 15$  мин после включения стенда — по-видимому, за счёт механизма, который обсуждался в подразделе 6.1.

Несколько меньше увеличилась амплитуда пульсаций в интервале времени 14:30÷15:05 UT и далее до 16:40 UT. Это возмущение запаздывает на  $\Delta t \approx 45$  мин (см. рис. 5). При расстоянии R = 960 км и мгновенном включении источника получаем скорость v = 355 м/с. Такую скорость имеют акустико-гравитационные волны на высотах динамо-области, где и находится источник геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов  $T \approx 8 \div 12$  мин. Следующее увеличение амплитуды компоненты  $H_{3B}$  в период 18:30÷19:00 UT может быть связано как с работой стенда «Сура», так и с движением вечернего терминатора.

Рост амплитуды всплесков в компоненте  $H_{\rm IOC}$  в период 13:35÷14:10 UT мог быть вызван как естественными причинами, так и ударным воздействием мощного радиоизлучения на подсистемы общей системы Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера (см. рис. 6). Незначительное увеличение амплитуды пульсаций с 14:30 до 16:10 UT могло быть связано с приходом акустикогравитационной волны от места воздействия мощного радиоизлучения. При этом время запаздывания  $\Delta t \approx 45$  мин, а скорость волны v = 355 м/с. Эти параметры для обеих компонент геомагнитного поля оказались близкими.

29 августа 2012 года рост амплитуды геомагнитных пульсаций в компоненте  $H_{3B}$  с 16:00 до 16:30 UT, скорее всего, связан с включением стенда и, как результат, с ударным воздействием на указанные выше подсистемы. Чёткого проявления прихода акустико-гравитационных волн в этом цикле обнаружить не удалось.

Для компоненты  $H_{\text{IOC}}$  ситуация несколько иная. Значительный рост её амплитуды в интервале времени 15:00÷16:00 UT, по-видимому, вызван естественными причинами. Увеличение амплитуды пульсаций с 16:40 до 18:45 UT могло быть связано с приходом акустико-гравитационной волны. При этом время запаздывания  $\Delta t \approx 40$  мин, скорость волны v = 400 м/с.

30 августа 2012 года увеличение амплитуды компоненты  $H_{3B}$  в интервале времени 10:10÷ ÷10:30 UT соответствует запаздыванию  $\Delta t \approx 10$  мин, длительности возмущения  $\Delta T = 20$  мин и скорее всего, вызвано ударным воздействием мощного радиоизлучения на околоземную подсистему (см. подраздел 6.1). В то же время рост амплитуды пульсаций с 10:40 до 11:30 UT (которому соответствовали времена  $\Delta t = 40$  мин и  $\Delta T = 50$  мин), по-видимому, вызван приходом акустикогравитационной волны со скоростью около 400 м/с и периодом  $T \approx 10$  мин (см. рис. 5). С такой же волной, но распространяющейся по более длинной траектории, могло быть связано и колебание, наблюдавшееся в интервале времени  $11:45\div12:40$  UT. Подобные случаи упоминались в работе [20]. Однако более вероятно, что волна генерировалась при выключении серии циклов нагрева. Тогда время запаздывания  $\Delta t \approx 30$  мин, скорость волны  $v \approx 530$  м/с и продолжительность всплесков  $\Delta T = 55$  мин. Ещё более чётко наблюдались колебания в компоненте  $H_{3B}$  в интервале 17:40÷18:20 UT. При этом временные параметры  $\Delta t \approx 40$  мин,  $\Delta T \approx 40$  мин,  $T \approx$ 

 $\approx 8\div12$  мин, скорость волны  $v \approx 400$  м/с. Интересно, что в период 17:40÷18:20 UT амплитуда пульсаций увеличилась от 0,5÷0,7 до 2 нТл. Возможно, что такому увеличению способствовал эффект вечернего терминатора.

Чёткого увеличения амплитуды пульсаций в компоненте  $H_{\text{IOC}}$  не было обнаружено в диапазоне периодов 8÷12 мин при излучении стенда в режиме [+5 мин; -5 мин] 30 августа 2012 года (см. рис. 6). Скорее всего, это связано с низкой эффективной мощностью излучения, равной сначала 65 MBT, а затем 45 MBT, и многолепестковой диаграммой направленности (мощную радиоволну излучали два модуля стенда, антенные решётки которых разнесены по линии север—юг на 200 м).

Обсудим рост амплитуды пульсаций с периодом  $T \approx 12 \div 18$  мин при работе стенда в режиме [+15 мин; -15 мин]. Увеличение амплитуды переменной компоненты  $H_{3B}$  с 18:10 до 19:10 UT, по-видимому, связано с движением вечернего терминатора (см. рис. 7). Некоторое увеличение амплитуды в интервале 19:25÷20:10 UT может быть обусловлено работой стенда. При этом задержка  $\Delta t \approx 45$  мин, скорость v = 355 м/с, длительность возмущения  $\Delta T \approx 55$  мин, период  $T \approx 212\div 18$  мин. Такие параметры свойственны акустико-гравитационным волнам. Их проявления, скорее всего, наблюдались и 29 августа 2012 года в интервалах 11:45÷13:10 UT и 19:10÷19:45 UT (см. рис. 7). При этом параметры следующие:  $\Delta t \approx 60$  мин,  $v \approx 270$  м/с,  $\Delta T \approx 85$  мин и  $\Delta t \approx 40$  мин,  $v \approx 400$  м/с,  $T \approx 35$  мин соответственно. Пульсации с 21:45 до 21:30 UT, по-видимому, имеют естественное происхождение.

Кратковременное ( $\Delta T \approx 30$  мин) увеличение амплитуды компоненты  $H_{\rm HOC}$  в интервале 18:40÷19:20 UT может быть обусловлено ударным воздействием (см. подраздел 6.1). При этом время запаздывания  $\Delta t \approx 10$  мин (см. рис. 8). Значительный рост амплитуды пульсаций с 20:50 до 21:50 UT, по-видимому, имеет естественное происхождение. Проявление акустико-гравитационных волн, скорее всего, отмечалось 29 августа 2012 года в период 11:20÷13:10 UT ( $\Delta t \approx 35$  мин, v = 460 м/с,  $\Delta T \approx 90$  мин) и, возможно, с 19:10 до 20:10 UT ( $\Delta t \approx 40$  мин, v = 400 м/с,  $\Delta T \approx 60$  мин). Колебание компоненты  $H_{\rm HOC}$  в интервале 20:30÷22:00 UT следует отнести к колебаниям естественного происхождения.

Таким образом, в работе дано описание апериодических и квазипериодических вариаций амплитуды геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов 40÷1000 с, которые сопровождали воздействие на ионосферную плазму мощным радиоизлучением и были зарегистрированы на удалении 960 км от нагревного стенда «Сура». Проявление и сила эффектов существенно зависели от режима излучения нагревного стенда.

### выводы

На расстоянии около 960 км от нагревного стенда «Сура» обнаружено апериодическое увеличение амплитуды переменных горизонтальных компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов  $300\div1000$  с. Всплески запаздывали по отношению к включению квазинепрерывного радиоизлучения стенда на  $10\div20$  мин, их продолжительность составляла  $10\div45$  мин. Всплески появлялись 28–30 августа 2012 года при работе стенда в режиме [+30 мин; -30 мин] с относительной частотой 0,64 и 0,45 для компонент геомагнитного поля  $H_{3B}$  и  $H_{\rm HOC}$  соответственно. Апериодические всплески геомагнитных пульсаций объясняются всплесками концентрации электронов в ионосфере на высотах динамо-области.

Обнаружено заметное увеличение амплитуды пульсаций в диапазонах периодов 40÷80 и 100÷140 с с временем запаздывания 8÷10 мин при работе нагревного стенда «Сура» в режиме [+1 мин; -1 мин]. Эффект лучше выражен для компоненты  $H_{\rm HOC}$  геомагнитного поля. Обнаруженное усиление пульсаций объясняется генерацией МГД волн с соответствующими периодами под воздействием мощного радиоизлучения стенда.

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов

Обнаружены квазипериодические вариации обеих компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов  $8\div12$  мин при работе нагревного стенда в режимах [+5 мин; -5 мин] и [+10 мин; -10 мин], имеющие время запаздывания  $35\div45$  мин, скорость распространения  $320\div460$  м/с и длительность цуга  $40\div90$  мин. Также обнаружены вариации в диапазоне периодов  $12\div18$  мин при излучении стенда в режиме [+15 мин; -15 мин], для которых время запаздывания составляло  $35\div45$  мин, скорость распространения  $355\div460$  м/с, длительность цуга  $55\div90$  мин. Геомагнитные пульсации с такими периодами связываются с модуляцией ионосферных токов на высотах динамо-области акустико-гравитационными волнами, генерируемыми под действием мощного радиоизлучения нагревного стенда. Возможность наблюдения таких волн на расстояниях около 960 км от источника нами неоднократно подтверждалась.

Авторы благодарны К. П. Гармашу и С. Г. Леусу за обеспечение непрерывных измерений на магнитометре-флюксметре, Г. П. Комракову за организацию функционирования нагревного стенда и А. В. Давиденко за помощь в обработке и представлении результатов наблюдений. Экспериментальные исследования на стенде «Сура» выполнялись при финансовой поддержке ФЦП «Геофизика» и РФФИ (проект 11–02–00374).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.
- 2. Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. Berlin: Springer-Verlag, 1978. 465 p.
- 3. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984. 392 с.
- 4. Митяков Н. А., Грач С. М., Митяков С. Н. // Итоги науки и техники. Сер. «Геомагнетизм и высокие слои атмосферы». М.: Наука, 1989. Т. 9. С. 140.
- 5. Гуревич А.В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
- 6. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. // Компьютерная оптика. 1989. Вып. 6. С. 62.
- 7. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. // Зарубежная радиотехника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 6. С.17.
- 8. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1, № 1. С. 90.
- 9. Черногор Л. Ф. Нелинейная радиофизика. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2004. 200 с.
- Черногор Л. Ф. Нелинейность в природе и науке. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. 258 с.
- Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 3. С. 173.
- 12. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2013. Т. 18, № 1. С. 49.
- Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 2. С. 110.
- Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 859.
- 15. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 377.
- Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 81.
- 17. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 14.
- Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 5. С. 327.

- 19. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 4. С. 219.
- 20. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 307.
- 21. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49, № 3. С. 403.
- 22. Черногор Л.Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. Харьков: XHУ им. В. Н. Каразина, 2009. 386 с.
- 23. Chernogor L.F., Blaunstein N. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-Earth environment. New York: Taylor and Francis Group, 2013. 542 p.
- 24. Черногор Л. Ф. // Космические исследования. 2013. Т. 51, № 6. С. 455.
- Черногор Л. Ф., Вертоградов Г. Г., Урядов В. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 12. С. 766.
- 26. Ахмедов Р.Р. Численное моделирование генерации акустико-гравитационных волн и ионосферных возмущений от наземных и атмосферных источников. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2004. 131 с.
- 27. Ришбет Г., Гарриот О. К. Введение в физику ионосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 304 с.
- 28. Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 2. С. 209.
- 29. Ahmadov R. R., Kunitsyn V. E. // Int. J. Geomagn. Aeron. 2004. V. 5. Art. no. GI2002.
- 30. Stubbe P., Kopka H. // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 2 319.
- 31. Fejer J. A., Krenzien E. // J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44. P. 1075.
- 32. Stubbe P., Kopka H. // J. Geophys. A. 1981. V. 86, No. 3. P. 1606.
- 33. Stubbe P., Kopka H., Lauche H., et al. // J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44, No. 12. P. 1025.
- 34. Stubbe P., Kopka H., Rietveld, et al. // J. Atmos. Terr. Phys. 1985. V. 47, No. 12. P. 1151.
- 35. Kuo S. P., Lee M. C // Geophys. Res. Lett. 1983. V. 10, No. 10. P. 979.
- 36. Lee M. C., Kuo S. P. // Radio Sci. 1985. V. 20, No. 3. P. 539.
- 37. Kuo S. P., Cheng W.-T., Cohen J. A., et al. // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. Art. no. L09107.
- 38. Kuo S., Cheng W.-T., Snyder A., et al. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. Art. no. L01101.
- Пудовкин М. И., Распопов О. М., Клейменова Н. Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 2. Л.: Изд-во МГУ, 1976. 270 с.
- 40. Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме. М.: Наука, 1979. С. 139.
- 41. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 304 с.
- 42. Лихтер Я.И., Гульельми А.В., Ерухимов Л.М., Михайлова Г.А. Волновая диагностика приземной плазмы. М.: Мир, 1988. 215 с.
- 43. Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат, 1982. 136 с.
- 44. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука, 2008. 295 с.
- 45. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2012. 556 с.

Поступила в редакцию 2 декабря 2013 г.; принята в печать 26 февраля 2014 г.

## GEOMAGNETIC-PULSATION AMPLITUDE AND SPECTRUM VARIATIONS ACCOMPANYING THE IONOSPHERIC HEATING BY HIGH-POWER RADIO WAVES FROM THE SURA FACILITY

## L. F. Chernogor and V. L. Frolov

Aperiodic and quasiperiodic variations in the geomagnetic pulsation amplitude in a range of periods from 40 to 1000 s, which accompany the quasicontinuous and periodic impact on the ionospheric

plasma by high-power radio waves from the SURA facility near Nizhny Novgorod (Russia) were recorded near Kharkov (Ukraine) using a magnetometer–fluxmeter. The main parameters of aperiodic and quasiperiodic disturbances of the geomagnetic field are determined. The mechanisms for generation and propagation of detected disturbances are discussed.