

УДК 550.388, 520.16 + 523.31 + 523.9:520.86

КОЛЕБАНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, ВЫЗВАННЫЕ ПРОЛЕТОМ ВИТИМСКОГО БОЛИДА 24 СЕНТЯБРЯ 2002 г.

© 2011 г. Л. Ф. Черногор

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина
e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 18.04.2008 г.

После доработки 29.07.2010 г.

Приведены результаты наблюдения и анализа колебаний геомагнитного поля в диапазоне периодов 1–1000 с, последовавших за пролетом болида массой 50 т, диаметром около 3 м и начальной кинетической энергией 10^{13} Дж на удалении 4850 км. Спектральный анализ временных вариаций уровня колебаний геомагнитного поля производился с использованием трех интегральных преобразований. Обнаружены и идентифицированы четыре группы возмущений, которым соответствовали следующие скорости переноса: 7–8 км/с, 800–850, 300–400 и 260–280 м/с. Перечисленные скорости близки к скоростям, которые наблюдались в геомагнитных пульсациях после стартов ракет с космодромов Плесецк и Байконур. Магнитометрические данные подтверждены результатами анализа записей на микробарографе, удаленном от траектории полета болида на расстояние 4350 км.

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение и анализ временных вариаций параметров колебаний геомагнитного поля является эффективным, гибким и дешевым методом мониторинга целого ряда процессов на Солнце, в межпланетной среде, геокосмосе, на Земле и под Землей ([Гульельми, 1979; Нишида, 1980; Лихтер и др., 1988]). Колебания геомагнитного поля вызываются вспышками на Солнце, выбросами корональной массы, рядом процессов в магнитосфере, ионосфере и атмосфере, сейсмичностью и т.д. Кроме естественных источников колебаний геомагнитного поля, существуют источники искусственного происхождения. К ним относятся мощные взрывы под Землею, на Земле, в атмосфере и геокосмосе, старты и полеты ракет, инжекция химических реагентов, мощное радиоизлучение и др. [Сорокин и Федорович, 1982; Черногор, 2003; Афраимович и Перевалова, 2006; Гармаш и др., 2007].

В наблюдениях регистрируется сложная интерференционная картина, представляющая собой наложение колебаний геомагнитного поля, вызванных различными источниками. Пожалуй, самой трудной задачей является идентификация реакции геомагнитного поля на воздействие конкретного источника. Задача идентификации существенно облегчается, когда известны параметры источника колебаний геомагнитного поля (время, место срабатывания, энергетика и т.п.). Такими источниками могут быть мощные взрывы, инжекция вещества, старты и полеты ракет, а также падение достаточно крупных космических

тел, обнаруживаемых другими, например, оптическими или радиолокационными методами.

Известно, что крупные космические тела, вторгаясь в геокосмос и атмосферу, вызывают целый комплекс процессов, к которым относятся нагрев, испарение, диссоциация, ионизация самого тела и атмосферы, генерация электромагнитных, ударных воздушных и акустико-гравитационных волн, возмущения геоэлектрического и геомагнитного полей и т.п. [Бронштэн, 1981; Стулов и др., 1995; Катастрофические..., 2005]. Геомагнитный эффект, вызываемый падениями достаточно крупных космических тел, исследуется давно [Иванов, 1961, 1962, 1967; Савченко, 1975, 1976], большое число работ посвящено геомагнитному эффекту Тунгусского феномена [Иванов, 1961, 1962, 1967, 2002; Немчинов и др., 1999; Бронштэн, 2002]. И хотя этот эффект известен с начала 1960-х гг., полное теоретического объяснения до настоящего времени он не получил [Бронштэн, 2002; Иванов, 2002]. В цитируемых работах изучалось возмущение главного магнитного поля Земли. Показано, что оно напоминает бухтообразное возмущение геомагнитного поля в ходе умеренной магнитной бури.

Вместе с тем несомненный интерес представляет изучение реакции геомагнитного поля в диапазоне колебаний геомагнитного поля (периоды $T \approx 1–1000$ с) на вторжение в атмосферу достаточно крупных космических тел. Механизмы генерации колебаний геомагнитного поля при этом, скорее всего, существенно отличаются от механизма возмущения главного магнитного поля Земли. При этом необходимо иметь в виду два обстоятельства. Во-первых, можно ожидать, что ко-

лебания геомагнитного поля могут генерироваться относительно небольшими космическими телами (например, с диаметром порядка 1 м) и распространяться на расстояния в несколько тысяч километров. Во-вторых, тела с такими размерами вторгаются в атмосферу достаточно часто (например, один раз в неделю или месяц) [Кручиненко и др., 1999; Brown et al., 2002a, 2002b]. Для сравнения укажем, что космический объект, соизмеримый с Тунгусским телом, падает на Землю в среднем один раз в 100–200 лет [Кручиненко и др., 1999] или даже раз в 1000 лет [Brown et al., 2002b].

Целью настоящей работы является анализ результатов наблюдения колебаний геомагнитного поля, а также физических процессов, сопровождавших падение Витимского болида 24 сентября 2002 г. диаметром около трех м.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О БОЛИДЕ

Пролет болида был зафиксирован оптически и инфракрасными датчиками геостационарной системы контроля космического пространства ВВС США 24 сентября 2002 г. в 16:48:56 UT (здесь и далее – мировое время). Болид был обнаружен на высоте около 62 км, его пролет фиксировался до высоты примерно 30 км [Адушкин и др., 2004; Язев и Антипин, 2004]. Началу и концу свечения объекта соответствовали координаты 57.91°N 112.90°E и 58.21°N , 113.46°E . Максимум удельной (отнесенной к 1 стерadianу) интенсивности излучения болида $P_{\Omega, \max} \approx 2.4 \times 10^{11}$ Вт/стер. Полет космического тела закончился взрывом. Ему предшествовали нагрев, абляция и дробление болида. Пролет тела вызвал яркое свечение (от белого до красного, а затем бордового), сильный гул, взрыв, генерацию ударной волны, повреждение леса на отдельных участках в зоне шириной 5–7 км и длиной около 50 км вдоль трассы падения. На отдельных участках доля сломанных деревьев достигала 10–15%, на других – не превышала 5% [Язев и Антипин, 2004].

В работе [Адушкин и др., 2004] приведены результаты наблюдения за инфразвуковыми и сейсмическими эффектами пролета Витимского болида и по сейсмическим данным оценена высота (27 км) и координаты (58.3°N , 112.8°E) разрушения болида, а по инфразвуковым данным – начальная энергия ($\sim 10^{13}$ Дж) и размеры облака обломков болида (8–9 м). Добавим, что в работе [Адушкин и др., 2004] анализировались сейсмические сигналы станций, удаленных от эпицентра взрыва на расстояния $R \approx 140$ –280 км, и инфразвуковые сигналы станций, удаленных на расстояния $R \approx 2000$ –4400 км. В спектре последних преобладали периоды 200 и 500 с. Основные параметры болида, вычисленные на основе данных полученных на американском спутнике и свиде-

тельств очевидцев, изложенных в [Адушкин и др., 2004; Азев и Антипин, 2004], приведены в табл. 1.

3. СОСТОЯНИЕ “КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ”

Временные вариации основных параметров, описывающих состояние “космической погоды”, представлены на рис. 1. Видно, что значения концентрации, температуры, скорости частиц и давления солнечного ветра не превышали 10^7 м^{-3} , $3 \times 10^5 \text{ К}$, 450 км/с и 2 нПа соответственно. Незначительными были плотности потоков электронов и протонов (не более 3×10^2 и $4 \times 10^4 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ стер $^{-1}$ соответственно). Значения Bt изменялись примерно от 4 до 12 нТл, а Bz – от –6 до +4 нТл. Также небольшими были вариации энергетической функции Акасофу (не более 15 ГДж/с), H_p -компоненты геомагнитного поля (от 50 до 130 нТл), индекса AE (не более 450 нТл), Dst -индекса (от –35 до 2 нТл) и индекса Kp (от 1 до 3).

Приведенные значения параметров, характеризующих состояние “космической погоды”, свидетельствуют о том, что за сутки до, в сутки и через сутки после пролета Витимского болида, “космическая погода” была спокойной. Не удалось найти и другие источники возмущений (старты ракет, землетрясения и т.п.), которые могли бы исказить эффекты пролета болида. Это существенно облегчило поиск и идентификацию эффектов в колебаниях геомагнитного поля, вызванных пролетом болида.

4. СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ

Для наблюдения колебаний геомагнитного поля применялся магнитометр-флюксметр, размещенный в Магнитометрической обсерватории Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина (с. Граково, Чугуевский район, Харьковская обл.) [Гармаш и др., 2003]. Его географические координаты: $49^{\circ}38' \text{ N}$, $36^{\circ}56' \text{ E}$, геомагнитные координаты: $+45^{\circ}20'$, $119^{\circ}20'$.

Абсолютная погрешность магнитометра определяется уровнем собственных шумов, который составляет 0.5 пТл – 0.5 нТл для периодов 1– 10^3 с соответственно.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Временные вариации H - и D -компонент магнитного поля для 23, 24 и 25 сентября 2002 г. показаны на рис. 2 и рис. 3.

Отметим сразу, что эффекты в магнитном поле, связанные с прохождением вечернего терминатора на высотах $z = 0$ –200 км, к моменту наблюдения возможных эффектов болида закончились.

Вначале проанализируем временные вариации H -компоненты для фоновых дней 23 и 25 сентяб-

Таблица 1. Основные параметры болида

Параметр	Значение	Примечание
Угол наклона к горизонту	30°	Вычислен на основе свидетельств очевидцев и по данным геостационарного спутника
Высота взрыва	~30 км	Косвенно по данным геостационарного спутника
Начальная скорость	20 км/с	Задана
Начальная масса	~50 т	Вычислена по кинетической энергии
Максимальная удельная интенсивность оптического излучения	2.4×10^{11} Вт/стер	Измерена на спутнике
Максимальная интенсивность оптического излучения	3×10^{12} Вт	Пересчитана автором по удельной интенсивности
Эффективная длительность оптического излучения	0.7 с	Вычислена из траекторных данных
Энергия оптического излучения	10^{12} Дж	Вычислена по интенсивности оптического излучения
Начальная кинетическая энергия	~ 10^{13} Дж	Вычислена по энергии оптического излучения
Энерговыведение	10^{13} Дж	Вычислена автором по интенсивности инфразвука, зарегистрированного на расстоянии 2012 км
Энерговыведение	~ 10^{13} Дж	Оценена автором по степени повреждения леса (до 10–15%)
Энерговыведение	~ 10^{13} Дж	Вычислена автором по сотрясению строений, дрожанию стекол и т.п.
Энергия ВГВ	~ 5×10^{11} Дж	Вычислена автором теоретически
Энергия акустического излучения	~ 10^{11} Дж	То же

ря. Из рис. 2 видно, что в H -компоненте поля наблюдались фоновые флуктуации с амплитудой 1–1.5 нТл. Амплитуда сигнала в полосах периодов 1–20, 20–100, 100–300 и 300–1000 с увеличивалась с ростом периодов колебаний. Почти таким же было поведение H -компоненты и 25 сентября. Только в интервале времени 21:00–21:15 наблюдался пакет колебаний геомагнитного поля с амплитудой в 2–3 раза превышающей ее значения до и после возникновения этого пакета. Колебания были хорошо выражены в спектральных окнах 20–100 и 100–300 с.

В день пролета болида поведение $H(t)$ существенно отличалось от того, что было в фоновые дни. Примерно в течение 1 ч (с 15:50 до 17:05) до события флуктуации H -компоненты были хаотическими, без ярко выраженного колебания с определенным квазипериодом (см. рис. 2б). После пролета болида характер сигнала изменялся четырежды: в сигнале просматривались колебания с хорошо выраженными квазипериодами, амплитуда колебаний заметно (в 1.5–2 раза) возрастала. Этим изменениям соответствуют задержки около 12–14, 105, 180 и 300 мин. Продолжительности этих процессов были около 55, 50, 55 и 50 мин соответственно. Особенно четко изменения характера сигнала проявлялись в диапазоне периодов 300–1000 с (см. рис. 2б). В полосе периодов 100–300 с усилились пульсации в ин-

тервале времени 20:50 – 21:10. Амплитуда колебаний при этом возросла в 1.5–2 раза. Менее заметным было увеличение (в 1.3–1.5 раза) амплитуд колебаний в окне с периодами 20–100 с. Это имело место в интервалах времени 21:05–21:15, 22:05–22:08 и 21:40–21:50. Возможно, что это был единый процесс, состоящий из группы цугов колебаний.

Далее опишем временные вариации D -компоненты. В фоновые дни (см. рис. 3) вариации были хаотическими. Эпизодически возникали колебания с амплитудами 2–3 нТл и периодами 300–1000 с.

После пролета болида практически в тех же временных интервалах, что и для H -компоненты, имели место четыре группы изменений характера сигнала (см. рис. 3б). В первой группе наблюдалось подавление колебаний, а в остальных группах – их усиление в 1.5–2 раза. Упомянутым группам соответствовали запаздывания 12–14, 105, 180 и 300 мин. Их продолжительности составляли 50, 50, 60 и 70 мин соответственно.

В предположении, что вызванные пролетом болида возмущения распространялись преимущественно в горизонтальном направлении от места падения космического тела до места наблюдения (расстояние $R \approx 4850$ км), вычислены характерные скорости перемещения этих возмущений.

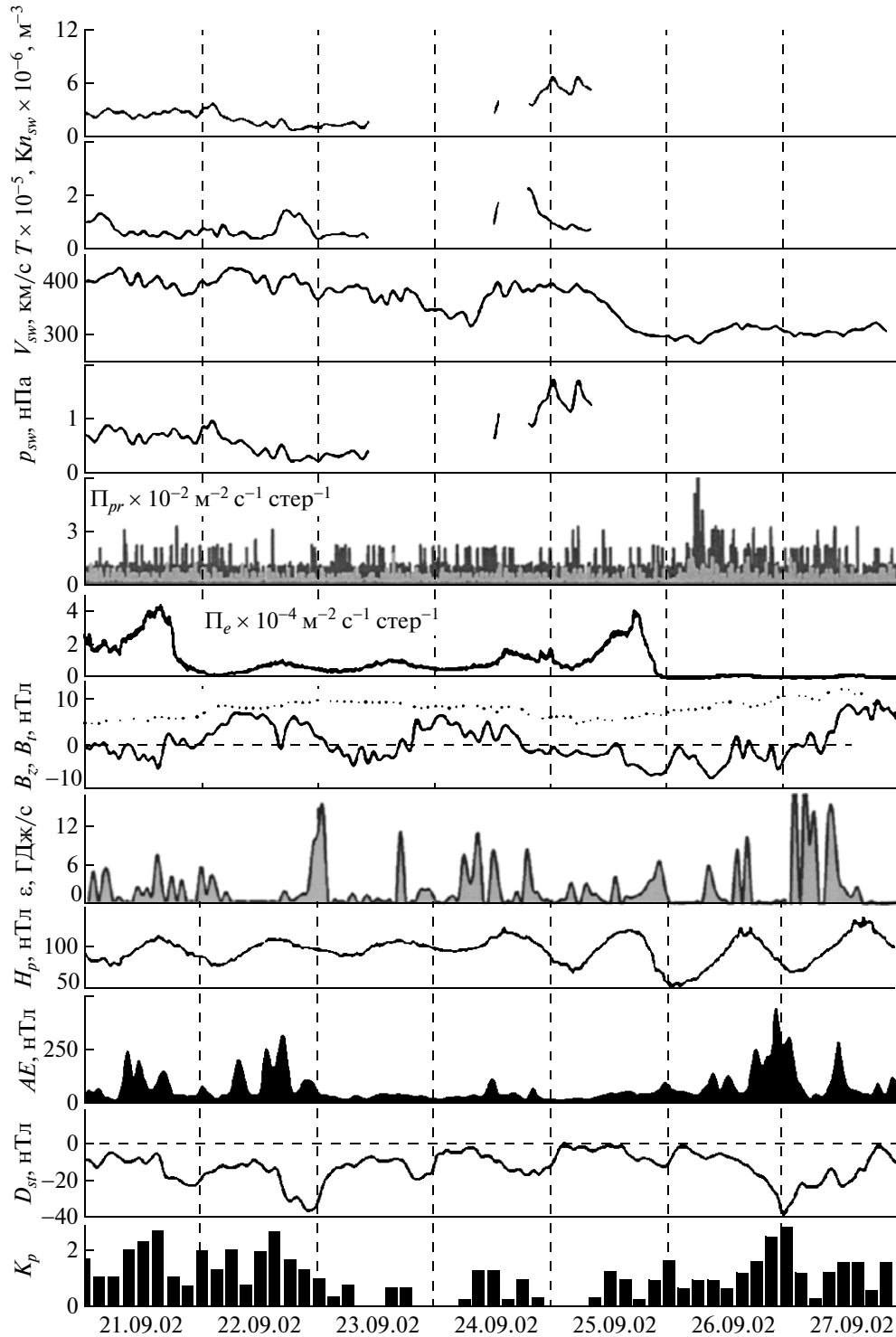


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра: концентрации частиц n_{sw} , температуры T , радиальной скорости V_{sw} по данным спутника ACE и динамического давления p_{sw} (расчет); плотностей потоков протонов Π_{pr} (GOES-8, W75) и электронов Π_e (GOES-12); компоненты B_z , модуля B_r межпланетного магнитного поля (ACE); ϵ – функции Акасофу (расчет); H_p -компоненты геомагнитного поля (GOES-12); AE -, D_{st} - и K_p -индексов.

Основные параметры колебаний геомагнитного поля, сопутствовавших пролету болида, приведены в табл. 2. По-видимому, возникали четыре группы возмущений, имевших скорости распространения, изменяющиеся от 270 м/с до 6–7 км/с.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Для спектрального анализа применялись оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) [Черногор,

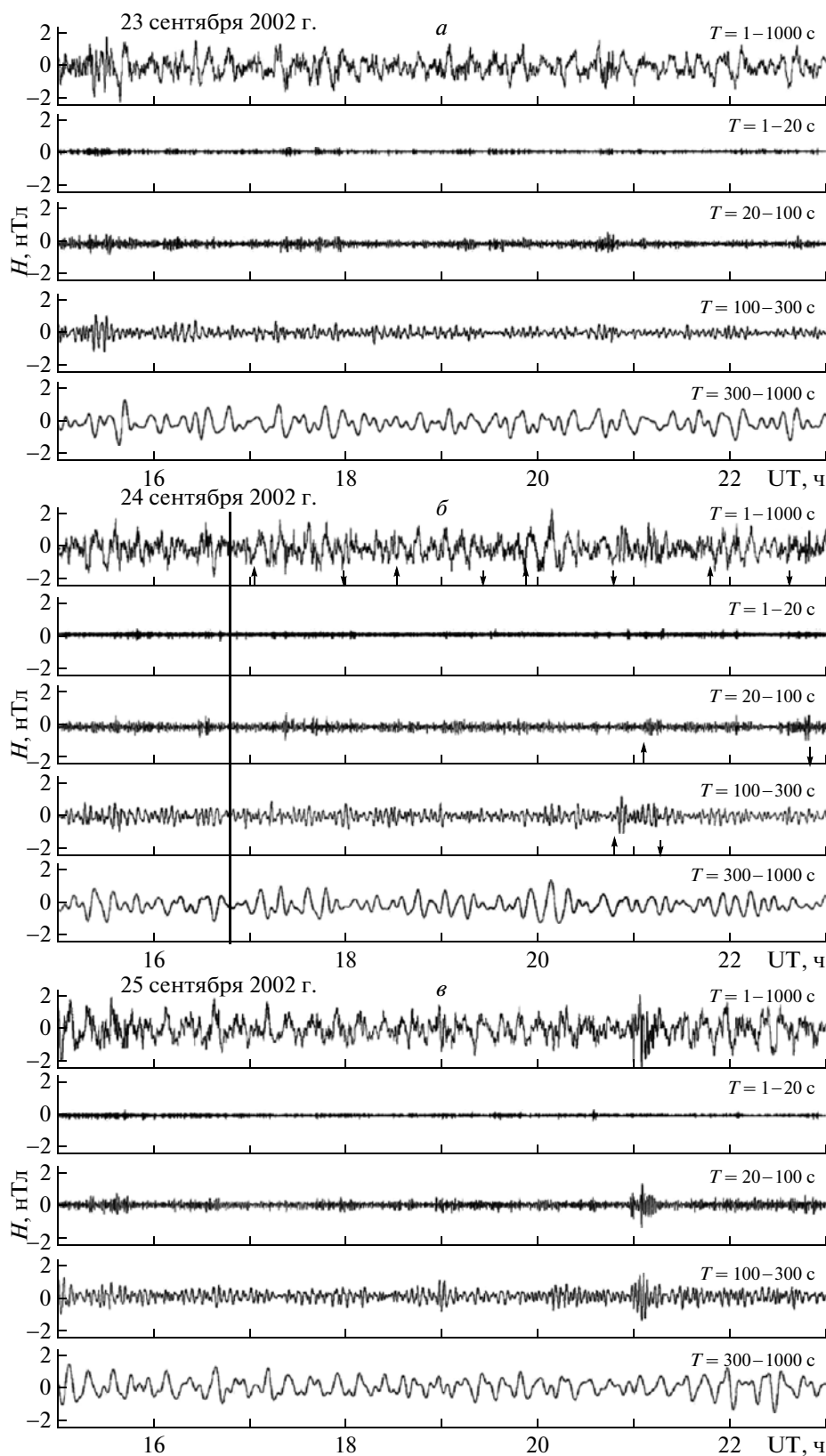


Рис. 2. Временные вариации H -компоненты геомагнитного поля: a – 23 сентября 2002 г.; b – 24 сентября 2002 г.; v – 25 сентября 2002 г. Панели сверху вниз: сигналы в полосе периодов 1–1000 с; в полосе 1–20 с; в полосе 20–100 с; в полосе 100–300 с и в полосе 300–1000 с. Сплошная вертикальная линия – момент пролета болида. Стрелками \uparrow и \downarrow показаны моменты начала и окончания изменения характера сигнала.

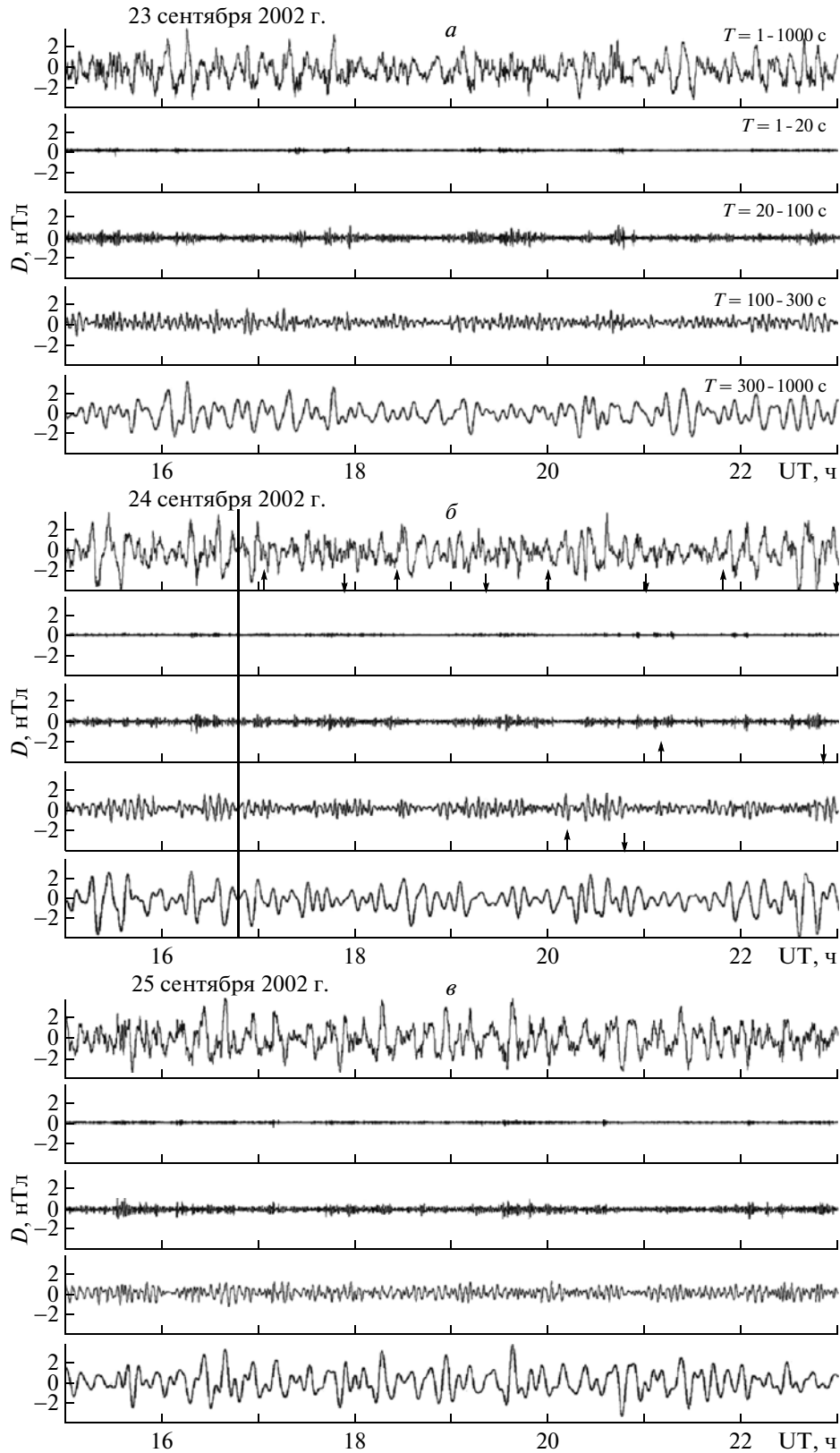


Рис. 3. Временные вариации D -компоненты геомагнитного поля: *a* – 23 сентября 2002 г.; *б* – 24 сентября 2002 г.; *в* – 25 сентября 2002 г. Панели сверху вниз: сигналы в полосе периодов 1–1000 с; в полосе 1–20 с; в полосе 20–100 с; в полосе 100–300 с и в полосе 300–1000 с. Сплошная вертикальная линия – момент пролета болида. Стрелками \uparrow и \downarrow показаны моменты начала и окончания изменения характера сигнала.

2008] и вейвлет-преобразование (ВП). В качестве базисной функции применялся вейвлет Морле [Малла, 2005]:

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

где ω и t – безразмерные частота и время.

По результатам ОПФ, АПФ и ВП строились временные зависимости функции спектральной плотности (причем осуществлялся переход от частоты к периоду колебаний) и энергограммы. Энергограммами нами были названы распределения энергии сигнала по интервалу периодов [Черногор, 2008].

Поскольку в наблюдениях регистрировались колебания геомагнитного поля в диапазоне периодов $T = 1–1000$ с, спектральный анализ производился в полосах периодов 20–100, 100–300 и 300–1000 с.

Результаты спектрального анализа приведены на рис. 4–6. Из этих рисунков видно, после пролета болида спектральные характеристики колебаний геомагнитного поля существенно изменялись. Скорее всего, имело место четыре группы возмущений (цугов колебаний). Это хорошо видно в полосе периодов 300–1000 с (см. рис. 6).

Наибольшее по энергии возмущение, проявляющееся в H -компоненте, имело запаздывание около 200 мин (скорость $v \approx 400$ м/с) и период

Таблица 2. Основные параметры колебаний магнитного поля, зарегистрированных в Магнитометрической обсерватории ХНУ им. В.Н. Каразина

Время запаздывания, мин	Скорость распространения, км/с	Преобладающие периоды, мин	Продолжительность, мин
12–14	6–7	10–15 (H -компонента) 8–10 (D -компонента)	50–55
95–105	0.8–0.85	8–12 (H -компонента) 10–15 (D -компонента)	50
180–190	0.43–0.45	12–14 (H -компонента) 13–17 (D -компонента)	55–60
300	0.27	8–10 (H -компонента) 10–14 (D -компонента)	50–70

600–800 с. Наиболее сильное возмущение, регистрируемое в D -компоненте, имело запаздывание около 300 мин ($v \approx 270$ м/с) и период 600–900 с. Как известно, такие же периоды имеют внутренние гравитационные волны (ВГВ) в атмосфере [Госсард и Хук, 1978; Голицын и др., 1977].

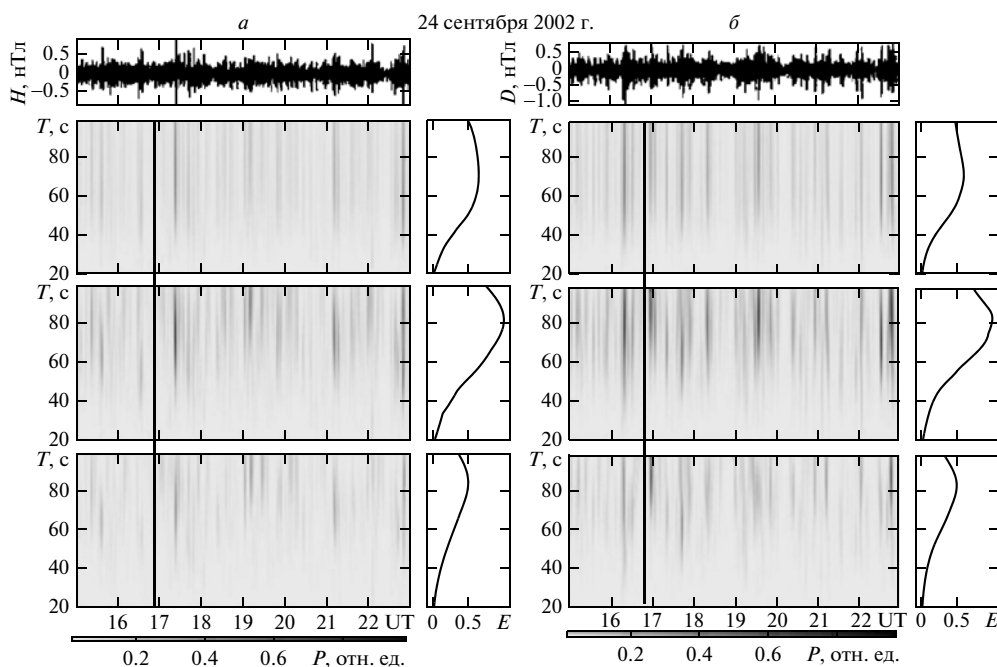


Рис. 4. Результаты спектрального анализа временных вариаций: a – H -компоненты, b – D -компоненты геомагнитного поля и соответствующие им энергограммы для 24 сентября 2002 г. Панели сверху вниз: временные вариации сигнала в полосе периодов 20–100 с, результаты ОПФ, результаты АПФ, результаты ВП. Сплошной вертикальной линией показан момент пролета болида.

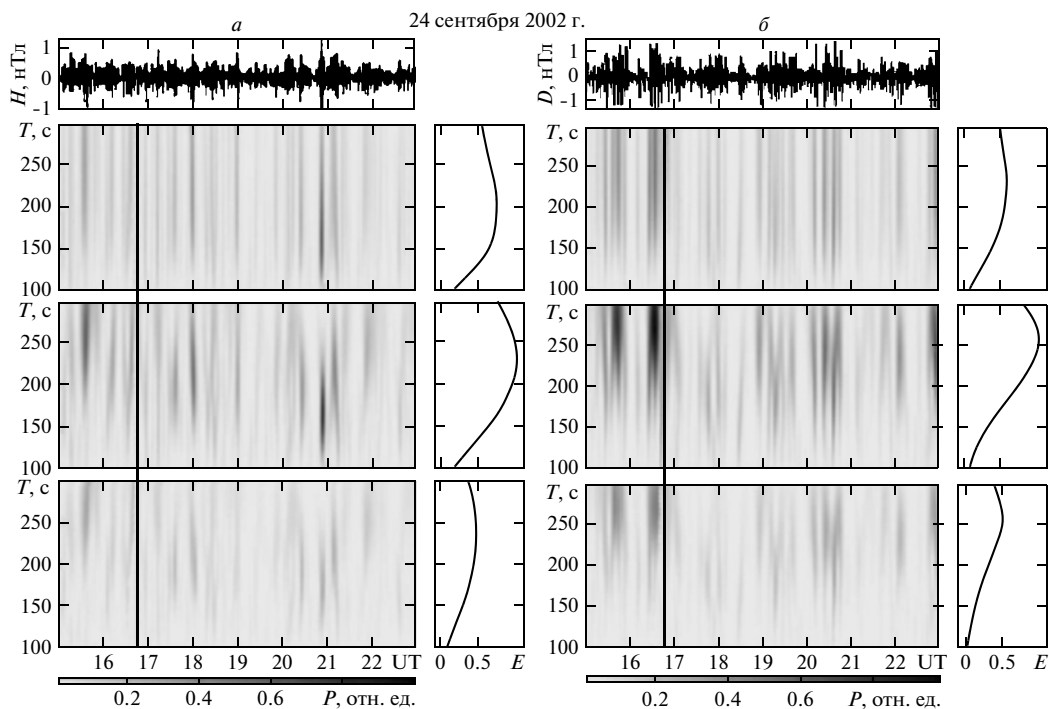


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, для полосы периодов 100–300 с.

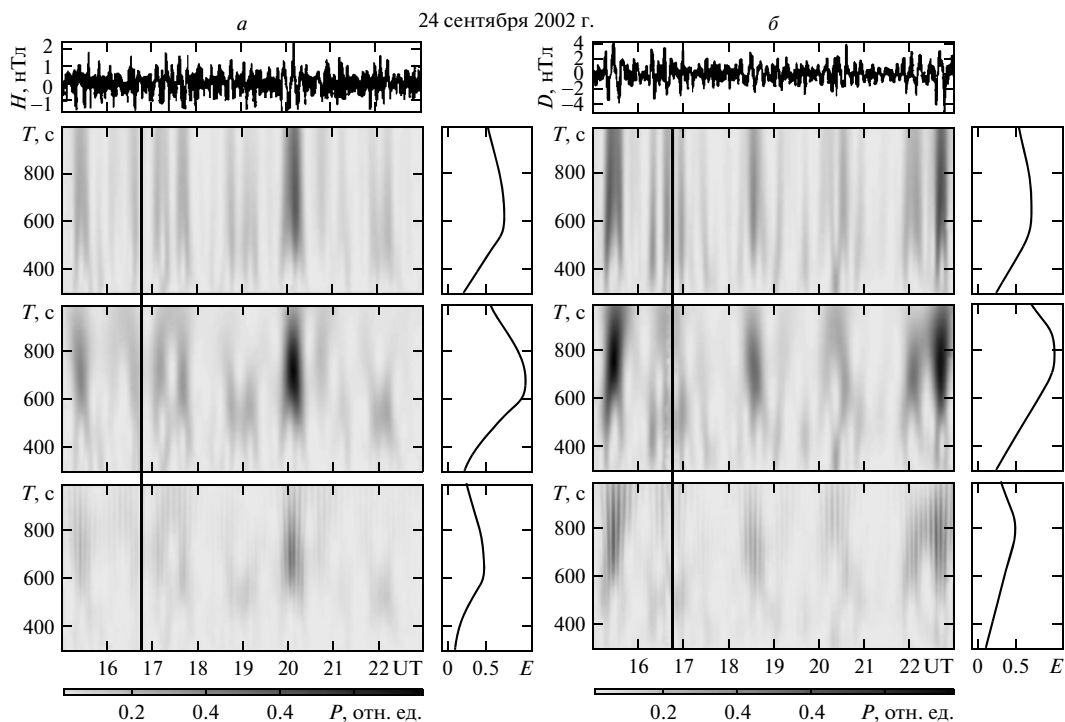


Рис. 6. То же, что и на рис. 4, для полосы периодов 300–1000 с.

В полосе периодов 100–300 с (такие же периоды имеет низкочастотный инфразвук в атмосфере) наиболее энергичные возмущения имели запазды-

вания около 200 и 240 мин для D - и H -компоненты. Им соответствовали скорости 410 и 340 м/с и периоды 150–300 и 100–220 с.

В полосе периодов 20–100 с (такие же периоды имеет среднечастотный инфразвук в атмосфере) наиболее сильные возмущения имели запаздывания около 36 и 260 мин для H -компоненты и 11, 55 и 170 мин для D -компоненты. Таким задержкам могли соответствовать скорости около 2.3 км/с и 310 м/с для H -компоненты и около 7.4 км/с, 1.5 км/с и 480 м/с для D -компоненты. Наибольшую энергию имели пульсации с периодами 60–90 с.

Значения скоростей распространения возмущений, определенные по результатам спектрального анализа, приведены в табл. 3. Сравнение скоростей, найденных этим способом и непосредственно по регистрациям колебаний, показали, что они близки между собою (сравните табл. 2 и табл. 3).

7. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Падение достаточно крупных болидов сопровождается целым комплексом физических процессов: нагревом, плавлением, испарением и свечением вещества, диссоциацией и ионизацией атмосферного газа и, в меньшей степени, вещества небесного тела, генерацией баллистической волны, дроблением и взрывом осколков болида, генерацией ударной и акустико-гравитационной (АГВ) волн, выбрасыванием вверх или всплыванием горячих продуктов взрыва, геомагнитным эффектом и т.д. [Бронштэн, 1981; Коробейников и др., 1991; Стулов и др., 1995; Стулов, 2006; Шувалов и Трубецкая, 2007]. Не ставя перед собой цели подробно описать все эти эффекты в одной статье, остановимся лишь на части процессов, существенных для теоретической оценки геомагнитного эффекта.

Энергетика свечения болида. Из измерений на спутнике США известно, что максимальная удельная интенсивность оптического излучения $P_{\Omega m} \approx 2.4 \times 10^{11}$ Вт/стер (см., например, [Язев и Антипин, 2004]). Тогда максимальная интенсивность оптического излучения $P_m = 4\pi P_{\Omega \max}$ составляет 3×10^{12} Вт.

Оценим эффективную длительность Δt_r оптического излучения. Основное торможение болида произошло в диапазоне высот $\Delta z \approx H \approx 7$ км, где H – высота приведенной атмосферы в окрестности высоты разрушения болида $z_0 \approx 30$ км. При этом болид пролетел расстояние $\Delta R = \Delta z / \sin \alpha = H / \sin \alpha \approx 14$ км, где $\alpha \approx 30^\circ$ – угол наклона траектории небесного тела к горизонту. Полагая, что болид имел типичную для таких небесных тел начальную скорость $v_0 \approx 20$ км/с, получим, что $\Delta t_r = \Delta R / v_0 \approx 0.7$ с. Тогда энергия световой вспышки болида $E_r \approx P_m \Delta t_r / 2 \approx 10^{12}$ Дж.

Начальная кинетическая энергия болида. Чтобы оценить начальную кинетическую энергию боли-

Таблица 3. Значения скоростей (м/с) распространения возмущений по результатам спектрального анализа

Компонента геомагнитного поля	Диапазон периодов, с		
	20–100	100–300	300–1000
H	2300		4000
	810	810	740
	450	450	400
	310	340	310
	260–270	270	270
D	7400		2100
	900	810	850
	400	410	400
	310–340		
	260	260	260

да E_k учтем, что в энергию световой вспышки преобразуется следующая доля энергии [Nemtchinov et al., 1997; Brown et al., 2002b]:

$$\eta_k = \frac{E_r}{E_k} = (0.1212 \pm 0.0043) E_r^{0.115 \pm 0.075},$$

где E_r измеряется в килотоннах тротила. Энергия $E_r \approx 10^{12}$ Дж ≈ 0.24 кт. Тогда $\eta_k \approx 9.2$ –11.8%, $E_k \approx 8.5 \times 10^{12}$ – 10.9×10^{12} Дж. В среднем $E_k \approx 10^{13}$ Дж.

Зная E_k и v_0 , можно легко вычислить начальную массу болида $m_0 = 2E_k / v_0^2 \approx 50$ т. При плотности вещества 3×10^3 кг/м³ начальный диаметр болида составлял $d \approx 3.2$ м.

Энергетика ударной волны и инфразвука. Полет болида сопровождался энерговыделением в диапазоне высот 28–35 км. Наибольшее энерговыделение имело место на высоте $z_0 \approx 30$ км. Энергию E_a и мощность P_a инфразвука можно оценить по временной регистрации уровня инфразвука $\Delta p(t)$, измеренной микробарографом на расстоянии $R \approx 2012$ км (рис. 7). При этом

$$E_a = \varepsilon_a V_a = 4\pi R^2 c \tau_a \varepsilon_a, \quad (1)$$

$$P_a = \Pi_a S_a = 4\pi R^2 \Pi_a = 4\pi R^2 c \varepsilon_a, \quad (2)$$

где $\varepsilon_a = (\Delta p_m)^2 / \rho_0 c^2$ – плотность энергии инфразвука на расстоянии R , Δp_m – амплитуда инфразвука, ρ_0 – невозмущенная плотность воздуха на высоте $z = 0$, c – скорость звука в приземной атмосфере, τ_a – длительность инфразвукового импульса, $\Pi_a = \varepsilon_a c$ – плотность потока энергии инфразвука, $V_a = S_a c \tau_a$ – объем, занимаемый импульсом инфразвука, $S_a = 4\pi R^2$ – площадь, окружающая источник инфразвука. Из записи $\Delta p(t)$ следует, что в среднем $\Delta p_m \approx 0.6$ Па, $\tau_a \approx 180$ с. Скорость инфра-

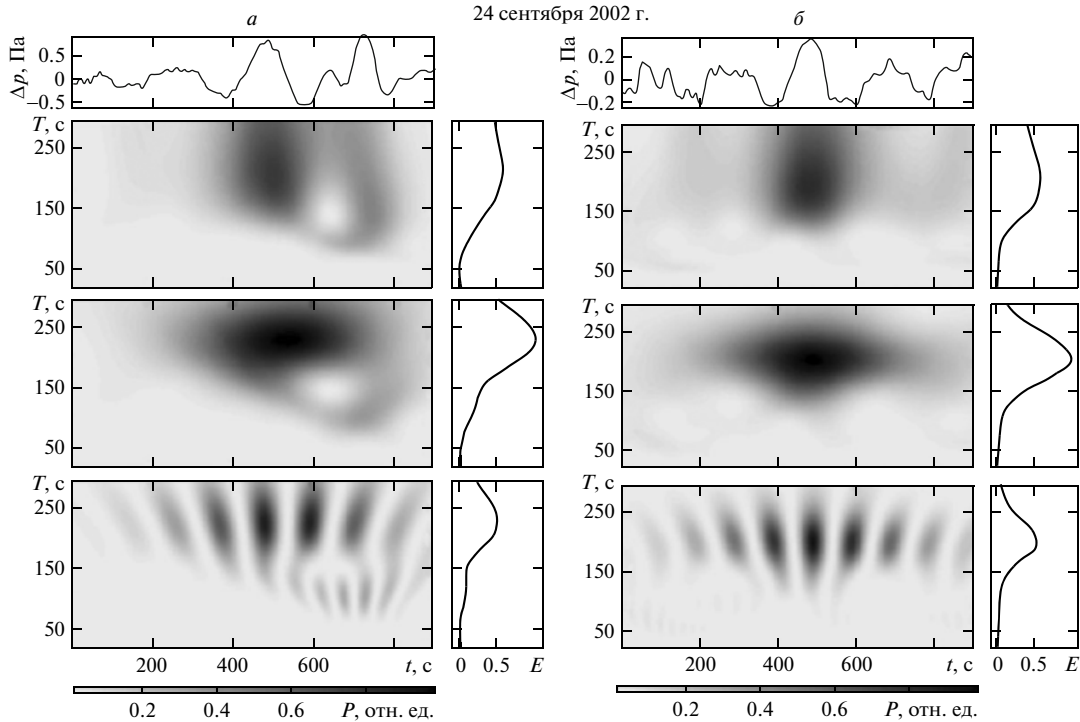


Рис. 7. Результаты спектрального анализа временных вариаций давления в приземной атмосфере: *a* – $R \approx 2012$ км, *б* – $R \approx 4350$ км и соответствующие им энергограммы для 24 сентября 2002 г. Панели сверху вниз: временные вариации сигнала, результаты ОПФ, результаты АПФ, результаты ВП. Время отсчитывается от момента появления квазипериодического возмущения.

звука была определена по временной задержке $\Delta t_a \approx 111$ мин и расстоянию $R \approx 2012$ км (см. далее). При этом $c \approx 300$ м/с. Тогда для $\rho_0 \approx 1.3$ кг/м³ имеем $\varepsilon_a \approx 3.7 \times 10^{-8}$ Дж/м³, $S_a \approx 5.1 \times 10^{13}$ м², $V_a \approx 2.7 \times 10^{18}$ м³. Вычисляя по формулам (1) и (2), получим, что $E_a \approx 10^{11}$ Дж, $P_a \approx 5.6 \times 10^8$ Вт.

Заметим, что полученное значение P_a соответствует длительности инфразвукового импульса на расстоянии $R \approx 2012$ км. В окрестности места взрыва длительность акустического импульса (воздушной ударной волны) была намного меньше – вероятно около 1 мс. При этом мощность ударной волны составляла около 10^{14} Вт. Полученное значение E_a на два порядка меньше E_k . Очевидно, что лишь небольшая часть кинетической энергии болида перешла в энергию инфразвука. В то же время энергия ударной волны близка к E_k .

Таблица 4. Основные параметры ударной волны в зависимости от расстояния от места взрыва (результаты расчетов)

R , км	30	35	40	45	50	55	60
Δp , кПа	2.2	1.8	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
t_+ , с	7.3	7.9	8.5	9.0	9.5	9.9	10.4
I , кПа · с	7.0	6.0	5.2	4.6	4.2	3.8	3.5

Зная энергию ударной волны, нетрудно вычислить избыточное давление Δp в волне, а также длительность t_+ и импульс I положительной фазы волны у поверхности Земли под местом взрыва болида (табл. 4). Оказалось, что на расстоянии $R \approx 30$ – 35 км $\Delta p \approx 2.2$ – 1.8 кПа, $t_+ \approx 7.3$ – 7.9 с и $I \approx 7$ – 6 кПа · с соответственно. При таких параметрах ударной волны возникают повреждения примерно 10–15% леса, что и наблюдалось исследователями эффектов Витимского болида [Язов и Антишин, 2004]. Повреждение около 5% леса имеет место при $\Delta p \approx 0.8$ – 1 кПа [Коробейников и др., 1991]. Заметим, что вычисление по критериям из [The effects..., 1977] параметров ударной волны, которая вызвала сотрясение построек и дрожание стекол, также приводит к $E_k \approx 10^{13}$ Дж.

Энергетика АГВ. В работе [Голицын и др., 1977] оценена доля кинетической энергии, переходящая в акустические и внутренние гравитационные волны:

$$\eta_a = \frac{(\gamma - 1)^2}{4\sqrt{2\pi}\gamma},$$

$$\eta_g = \frac{\gamma - 1}{4\sqrt{2\pi}\gamma} e^{1/2},$$

где $e \approx 2.78...$ – основание натурального логарифма, γ – показатель адиабаты. При $\gamma = 1.4$ имеем

$\eta_a \approx 1.1\%$, $\eta_g \approx 4.7\%$. Поскольку $E_a = \eta_a E_k \approx 10^{11}$ Дж, отсюда находим $E_k = \eta_a^{-1} E_a \approx 10^{13}$ Дж.

При пролете болида основное торможение происходило на расстоянии $L_1 \approx H/\sin \alpha \approx 2H$. Это расстояние и есть продольный размер источника АГВ. Поперечный размер (радиус) этого источника дается следующим соотношением [Цикулин, 1969]: $L_2 = \sqrt{E_e/L_1 p_0}$. Здесь E_e – энергосодержание при пролете болида, $E_e \approx E_k$, $p_0 \approx 10^3$ Па – давление на высоте основного энергосодержания (около 30 км).

Вычисляя, получим, что $L_1 \approx 14$ км, $L_2 \approx 845$ м. Объем источника АГВ $V_{ag} = \pi L_1 L_2^2 \approx 3.7 \times 10^9$ м³, а его эффективный размер $r_{ag} = V_{ag}^{1/3} \approx 1.6$ км. При $R \gg r_{ag}$ источник АГВ можно рассматривать как точечный.

Оценим амплитуду вариаций давления в месте наблюдения магнитного эффекта Витимского болида ($R \approx 4850$ км). По измерениям этих амплитуд на расстояниях $R \approx 2012$ км и $R = 4350$ км (см. рис. 7) оценен коэффициент затухания волн. Он оказался близок к 2.1×10^{-4} км⁻¹. С учетом сферической расходимости инфразвуковой волны от взрыва и ее затухания на расстоянии 4850 км амплитуда инфразвука $\Delta p_m \approx 0.2$ Па. При этом $\Delta p_m/p(0) \approx 2 \times 10^{-6}$, где $p(0) \approx 10^5$ Па – давление у поверхности Земли. Тогда на высотах $z \approx 120$ – 150 км $\Delta p_m/p \approx 0.6$ – 2% . Здесь учтено, что указанное отношение растет с увеличением высоты примерно по экспоненциальному закону с масштабом $2H$ (см., например, [Госсард и Хук, 1975]).

Амплитуду ВГВ, генерируемых при полете болида, оценим, исходя из следующих соображений. Как видно из значений η_a и η_g , энергия ВГВ примерно в 4 раза больше энергии инфразвуковых волн, а амплитуда Δp_m – в 2 раза. Поскольку ВГВ каналируются в термосферном волноводе толщиной $L_0 \approx 100$ км, то их ослабление будет в $(R/L_0)^{1/2} \approx 7$ раз меньше ослабления инфразвука на том же расстоянии. Таким образом, относительная амплитуда инфразвука и ВГВ над местом регистрации колебаний геомагнитного поля на высотах $z \approx 120$ – 150 км было около 1 и 14% соответственно.

Генерация колебаний геомагнитного поля. Вариации Δp сопровождалась волновыми возмущениями (ВВ) концентрации нейтралов, которые в свою очередь, модулировали с тем же периодом ионизированную составляющую – концентрацию электронов N . Заметим, что время становления N не превышало 100 с. Поэтому возмущения N успевали подстраиваться под ВВ нейтральной компоненты, если их период $T > 100$ с. ВВ N вызывали периодические вариации проводимости плазмы σ в динамо области, т.е. на высотах 120–

150 км. Их относительная амплитуда δ_σ также была около 1 и 14% при возмущении инфразвуком и ВГВ соответственно. Для оценки магнитного эффекта воспользуемся следующим уравнением Максвелла:

$$\text{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \Delta \mathbf{j}_0, \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, $\Delta \mathbf{j}_0 = j_0 \delta_\sigma$, j_0 – плотность невозмущенного тока в ионосфере, $\delta_\sigma \approx 1$ – 14% – амплитуда относительных вариаций проводимости плазмы в динамо области. Тогда из (3) амплитуда вариаций индукции геомагнитного поля

$$\Delta B \approx \mu_0 j_0 \delta_\sigma \Delta z_d, \quad (4)$$

где Δz_d – толщина этой области. Полагая, что в переходное время суток (вечером 24 сентября) $j_0 \approx 10^{-6}$ А/м², $\Delta z_d \approx 30$ км, из (4) получим $\Delta B \approx 0.4$ – 5.3 нТл. Примерно такие значения амплитуды колебаний и имели место в измерениях.

Добавим, что в работах [Савченко, 1975, 1976; Бронштэн, 2002] обсуждается другой, менее эффективный, механизм генерации магнитных возмущений под действием ударной волны крупных метеорных тел.

8. ОБСУЖДЕНИЕ

Отметим, что параметры болида и сопровождавших его пролет физических процессов, оцененные автором, хорошо согласуются с известными результатами [Адушкин и др., 2004; Язев и Антипин, 2004].

Далее обсудим надежность идентификации возмущений геомагнитного поля и их связь с пролетом болида. Самым сложным является ответ на вопрос “Могут ли возмущения распространяться на расстояния более 4 тыс. км при пролете болида с энергосодержанием $\sim 10^{13}$ Дж?” Ответ на этот вопрос положительный. Об этом свидетельствуют результаты работ [Адушкин и др., 2004; Язев и Антипин, 2004], временные вариации давления приземной атмосферы, зарегистрированные на расстояниях 2012 и 4350 км (см. рис. 7).

Возмущения давления запаздывали по отношению к моменту взрыва болида на 111 и 186 мин для станций расположенных восточнее и западнее от места падения космического тела. Амплитуды возмущений составляли 0.6 и 0.2 Па для удалений 2012 и 4350 км соответственно. Скорость распространения акустических возмущений, изображенных на рис. 7, составляла 300 и 390 м/с для пунктов наблюдения, находящихся восточнее и западнее места пролета болида. Различие в 90 м/с в этих скоростях, скорее всего, связано с разными условиями распространения акустических волн и, в частности, с влиянием ветра на передачу акустической энергии на тропосферно-стратосфер-

Таблица 5. Сравнение скоростей распространения геомагнитных возмущений, сопутствовавших пролету Витимского болида и стартами ракет (СР)

Источник возмущений	v_1 , км/с	v_2 , км/с	v_3 , км/с	v_4 , км/с
Полет болида (по регистрации колебаний геомагнитного поля)	6–7	0.8–0.85	320–340, 430–450	270
Полет болида (по результатам спектрального анализа)	~7	0.7–0.9	300–340, 400–450	260–270
СР с космодрома Плесецк	8–12	0.8–0.9	310–350	260–280
СР с космодрома Байконур	9	0.8–1.1	300–400	270–280

ных высотах. Средняя скорость ветра при этом была около 45 м/с.

На данных барографа, удаленного на расстояние 2012 км, в спектре АГВ преобладают компоненты с периодами 180–300 и 80–130 с. Энергия последних была примерно в 6 раз меньше, а их времена запаздываний – больше на 200 с. При указанном расстоянии это соответствовало меньшей примерно на 10 м/с скорости распространения (около 290 м/с). На данных барографа, удаленного на расстояние 4350 км, в спектре сигнала доминировали составляющие с периодами 170–250 с.

Возмущения давления имели место не только в приземной атмосфере, но и на ионосферных высотах. Хорошо известно, что относительная амплитуда давления в АГВ растет с увеличением высоты примерно по экспоненциальному закону. На высотах 100–150 км она на 3–4 порядка больше, чем у поверхности Земли (см., например, [Госсард и Хук, 1978]). Именно эти волны наиболее сильно модулируют параметры атмосферы, ионосферы и токовой струи и, в конечном итоге, вызывают колебания геомагнитного поля. Последние переносят больше информации, чем АГВ, потому, что колебания геомагнитного поля сопровождают распространение волн и другой природы (например, медленных МГД волн).

Как отмечалось выше, после пролета Витимского болида возникли четыре группы возмущений геомагнитного поля в полосе периодов 20–100 и 100–300 с, которым соответствовали скорости 6–7 км/с, 800–850, 300–400 и 260–270 м/с. Скорость 6–7 км/с имеют медленные МГД волны [Сорокин и Федорович, 1982]. Скорости 800–850 м/с свойственны ударным АГВ (УАГВ). В месте генерации амплитуда этих волн значительна (скачок давления порядка и больше невозмущенного давления газа). Такие волны являются нелинейными [Цикулин, 1969; Уизем, 1977]. Их скорость распространения может существенно превышать скорость звука на ионосферных высотах (последняя обычно не более 300–800 м/с). Такие волны неоднократно наблюдались нами и другими авторами при стартах ракет (см., например, [Бурмака и др., 2004; Афраймович, 2006]). Скорость 300–400 м/с близка к скорости инфразвука и скорости

АГВ [Госсард и Хук, 1978]. Скорость 260–270 м/с также свойственна ВГВ. Впрочем, эта, четвертая, группа возмущений могла быть продолжением третьей группы. Разность между временами запаздывания могла просто равняться периоду ВГВ. Действительно, $\Delta t_4 - \Delta t_3 = 120$ мин, такие периоды свойственны ВГВ.

Результаты сравнения скоростей распространения возмущений при пролете болида и стартах ракет с космодромов Плесецк и Байконур, полученных в ходе анализа уровня колебаний геомагнитного поля, приведены в табл. 5. Из таблицы видно, что скорости в каждой из групп достаточно близки друг к другу. Это свидетельствует о двух фактах. Во-первых, геомагнитные возмущения, которые последовали за пролетом болида, скорее всего, вызваны именно этим космическим телом. Во-вторых, возмущения, возникающие при мощных энерговыделениях, мало зависят от конкретного типа источника.

Сравним энергетики болида и ракетной струи. Для болида $E_k \approx 10^{13}$ Дж, удельная энергия $\tilde{E} = E_k/2H \approx 7.1 \times 10^8$ Дж/м. Для ракеты

$$\tilde{E} = \frac{dE_p}{dl} = \frac{1}{v_p} \frac{dE_p}{dt} = \frac{P_p}{v_p} = F,$$

где E_p – энерговыделение ракетной струи, dl – элемент траектории, $v_p = dl/dt$ – скорость ракеты, P_p – мощность ракетной струи, F – тяга ракеты в атмосфере. На высоте $z_0 \approx 30$ км \tilde{E} составляет около 4×10^6 Дж/м для ракеты типа “Союз” и около 10^7 Дж/м для ракеты типа “Протон”. Видно, что для ракет \tilde{E} значительно меньше, чем для Витимского болида. Почему же тогда амплитуды вызываемых колебаний геомагнитного поля для болида и ракет оказались близкими (единицы нанотесла)? Дело в том, что ракетная струя наиболее эффективно генерирует АГВ на высотах 100–150 км, где \tilde{E} составляет около 10^6 и 2.4×10^6 Дж/м для упомянутых ракет соответственно. Если эту удельную энергию пересчитать, исходя из теории подобия (см., например, [The effects..., 1977]), для высоты $z_0 \approx 30$ км, где давление газа на 4–6 поряд-

ков больше, то она оказывается эквивалентной удельной энергии $2 \times 10^7 - 10^8$ Дж/м для ракеты “Союз” и $5 \times 10^7 - 2.4 \times 10^8$ Дж/м для ракеты “Протон”. Видно, что значения $\tilde{E} \sim 10^8$ Дж/м для ракет и болида оказались вполне сопоставимы.

Соответствие результатов наблюдений результатам теоретических расчетов и оценок является еще одним аргументом в пользу того, что возникшие вслед за пролетом болида колебания геомагнитного поля вызваны именно этим событием.

В подтверждение того, что описываемые колебания геомагнитного поля вызваны пролетом болида, свидетельствует также то, что подобные вариации отсутствовали как за день до, так и на следующий день после события.

Перечислим еще раз факты, подтверждающие версию о том, что наблюдаемые колебания геомагнитного поля были связаны с пролетом Витимского болида.

1. Состояние “космической погоды” было спокойным. Отсутствовали и другие известные источники возмущений.

2. Вычисленные значения скоростей распространения возмущений близки к значениям скоростей, неоднократно описанным в литературе. Эти скорости соответствуют хорошо изученным типам волн.

3. Цуги колебаний, их параметры и скорости распространения возмущений похожи на аналогичные возмущения, возникающие после стартов ракет с космодромов Плесецк и Байконур [Гармаш и др., 2007]. При этом расстояния, проходимые возмущениями, и удельные энерговыделения сопоставимы. Расстояния от космодромов Плесецк и Байконур до места регистрации составляли около 1500 и 2300 км, а расстояния от области пролета болида до пункта регистрации — около 4850 км.

4. Результаты магнитных и акустических измерений, выполненных на близких от источника удалениях, согласуются между собой по скорости распространения возмущений и по значениям периодов преобладающих колебаний. Более того, геомагнитные возмущения второй, третьей и четвертой групп, скорее всего, генерируются в месте регистрации магнитного эффекта под действием АГВ, пришедших от места падения болида.

5. Соответствие результатов наблюдений уровня колебаний магнитного поля результатам теоретических расчетов.

6. Описываемые колебания геомагнитного поля после пролета болида по своим параметрам (амплитуде и периодам) заметно отличаются от колебаний в фоновые дни.

Поэтому, с определенной степенью уверенности можно утверждать, что в данной работе обнаружена и изучена реакция колебаний геомагнит-

ного поля в полосе периодов 1–1000 с на пролет и взрыв достаточно крупного космического тела (диаметром около 3 м).

9. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Значение кинетической энергии болида, оцененной разными способами, оказалось близким к 10^{13} Дж.

2. На основе анализа первичных регистраций вариаций геомагнитного поля обнаружены четыре группы возмущений (цугов колебаний), следовавшими за пролетом и взрывом болида. В предположении, что наблюдавшиеся задержки в реакции геомагнитного поля вызваны воздействием болида, определены скорости распространения возмущений. Они оказались близки к 6–7 км/с, 800–850, 430–450, 320–340 и 260–280 м/с (последние две скорости, по-видимому, образуют одну и ту же группу).

3. С использованием трех интегральных преобразований проведен спектральный анализ временных вариаций колебаний геомагнитного поля в различных полосах периодов. Наиболее четко выделялись четыре группы возмущений, имеющие примерно те же скорости, что и скорости, определенные непосредственно по временным вариациям уровня колебаний.

4. Обнаруженные группы скоростей близки к группам скоростей, полученным на основе анализа колебаний геомагнитного поля, сопровождавших старты ракет с космодромов Плесецк и Байконур.

5. Возмущения, вызванные пролетом болида, скорее всего, переносились при помощи медленных МГД волн ($v \approx 7-8$ км/с), УАГВ ($v \approx 800-850$ м/с), ВГВ ($v \approx 400-450$ м/с, $v \approx 260-280$ м/с) и инфразвук ($v \approx 300-340$ м/с). В последних трех случаях колебания геомагнитного поля, по-видимому, генерировались вблизи места их регистрации под действием УАГВ, ВГВ и инфразвук, пришедших от области падения болида.

Автор благодарен К.П. Гармашу и С.Г. Леусу за проведение непрерывных геомагнитных наблюдений, а В.П. Бурмаке, С.В. Панасенко и М.А. Шамоте за помощь, оказанную при работе над рукописью статьи.

Выражаю глубокую благодарность профессору Г.С. Иванову-Холодному за доброжелательную рецензию, положившую конец более чем двухлетней дискуссии и переписке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Попова А.П., Рыбнов Ю.С., Кудрявцев В.Н., Мальцев А.Л., Харламов В.А. Геофизические эффекты Витимского болида 24.09.2002 г. // ДАН. Т. 397. № 5. С. 685–688. 2004.

- *Афраймович Э.Л., Первалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ АВХ ВСНЦ СО РАН, 2006.
- *Бронштэн В.А.* Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981.
- *Бронштэн В.А.* Магнитный эффект Тунгусского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 6. С. 854–856. 2002.
- *Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Волновые возмущения в ионосфере, сопутствующие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 4. С. 518–534. 2004.
- *Гармаш К.П., Леус С.Г., Пазюра С.А., Похилько С.Н., Черногор Л.Ф.* Статистические характеристики флуктуаций электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 8. № 2. С. 163–180. 2003.
- *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. Т. 13. № 6. С. 87–98. 2007.
- *Голицын Г.С., Григорьев Г.Н., Докучаев В.П.* Изучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере // Изв. АН СССР. Физика Земли и океана. Т. 13. № 9. С. 926–935. 1977.
- *Гульельми А.В.* МГД-волны в околоземной плазме. М.: Наука, 1979.
- *Госсард Э.Э., Хук У.Х.* Волны в атмосфере: Инфразвук и гравитационные волны в атмосфере – их возникновение и распространение. М.: Мир, 1978.
- *Иванов К.Г.* Геомагнитные явления, наблюдавшиеся в Иркутской магнитной обсерватории после взрыва Тунгусского метеорита // Метеоритика. Вып. 21. С. 46–48. 1961.
- *Иванов К.Г.* Влияние локального повышения проводимости E-слоя ионосферы на S_q -вариацию магнитного поля Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 2. № 5. С. 943–947. 1962.
- *Иванов К.Г.* О природе воздействия Тунгусского падения на верхнюю атмосферу, геомагнитное поле и свечение ночного неба // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 7. № 6. С. 1033–1038. 1967.
- *Иванов К.Г.* Еще раз о проблеме моделирования геомагнитного эффекта Тунгусского падения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 6. С. 857–858. 2002.
- Катастрофические воздействия космических тел. Под ред. В.В. Адушкина и И.В. Немчинова. Институт динамики геосфер РАН. М.: ИКЦ “Академкнига”, 310 с. 2005.
- *Коробейников В.П., Чушкин П.И., Шуршалов Л.В.* Комплексное моделирование полета и взрыва в атмосфере метеорного тела // Астрономический вестник. Т. 25. № 3. С. 327–343. 1991.
- *Кручиненко В.Г., Волощук Ю.И., Кащев Б.Л., Казанцев А.М., Лупішко Д.Ф., Яцків Я.С.* Метеорно-астероїдна небезпека та доплив космічної речовини на Землю // Космічна наука і технологія. Т. 5. № 1. С. 3–17. 1999.
- *Лихтер Я.И., Гульельми А.В., Ерухимов Л.М., Михайлова Г.А.* Волновая диагностика приземной плазмы. М.: Наука, 1988.
- *Малла С.* Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005.
- *Немчинов И.В., Лосева Т.В., Мухин В.Г.* Оценка магнитного эффекта при падении Тунгусского метеорита // Физические процессы в геосферах: их проявления и взаимодействие (геофизика сильных возмущений). Сб. научн. тр. М.: ИДГ РАН, С. 324–338. 1999.
- *Нишида А.* Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980.
- *Савченко Ю.Н.* Геомагнитные возмущения, вызываемые ударными волнами крупных метеорных тел. I // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 15. № 6. С. 1047–1053. 1975.
- *Савченко Ю.Н.* Геомагнитные возмущения, вызываемые ударными волнами крупных метеорных тел. II // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 16. № 6. С. 518–525. 1976.
- *Сорокин В.М., Федорович Г.В.* Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат, 1982.
- *Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.И.* Аэродинамика болидов. М.: Наука, 1995.
- *Стулов В.П.* Крупные болиды: испарение и дробление // Астрономический вестник. Т. 40. № 3. С. 220–229. 2006.
- *Уизем Дж.* Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 624 с. 1977.
- *Цикулин М.А.* Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел. М.: Наука, 1969.
- *Черногор Л.Ф.* Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 8. № 1. С. 59–106. 2003.
- *Черногор Л.Ф.* Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 5. С. 681–702. 2008.
- *Шувалов В.В., Трубецкая И.А.* Гигантские болиды в атмосфере Земли // Астрономический вестник. Т. 41. № 3. С. 241–251. 2007.
- *Язев С.А., Антинин В.С.* По следам Витимского болида // Земля и Вселенная. № 5. С. 59–72. 2004.
- *Brown P., Whitaker R.W., ReVelle D.O., Tagliaferri E.* Multistation infrasonic observations of two large bolides: signal interpretation and implications for monitoring of atmospheric explosions // Geophys. Res. Lett. V. 29. P. 1–4. 2002a.
- *Brown P., Spalding R.E., ReVelle D.O., Tagliaferri E.* The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. V. 420. P. 294–296. 2002b.
- *Nemtchinov I.V., Svetsov V.V., Kosarev I.B. et al.* Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors // Icarus. V. 130. P. 259–274. 1997.
- The effects of nuclear weapons. Eds S. Glasstone, P.J. Dolan. Third Edition. US Department of Defense, US Department of Energy. 1977.