

Л. Ф. Черногор*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина**4, пл. Свободы, Харьков, 61022, Украина*E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua**КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ,
СОПРОВОЖДАВШИЕ ПАДЕНИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА**

Проведен анализ временных вариаций компонент геомагнитного поля в день падения метеорита «Челябинск» (15 февраля 2013 г.) и в контрольные дни (12 и 16 февраля 2013 г.). Для анализа выбраны магнитные обсерватории в г. Новосибирск, Алма-Ата, Киев и Львов. Расстояние R от места взрыва до обсерватории изменялось в пределах 1,2...2,7 тыс. км. Оказалось, что пролет и взрыв Челябинского космического тела сопровождался вариациями в основном горизонтальной компоненте геомагнитного поля. Вариации носили квазипериодический характер с периодом 30...40 мин, амплитудой 0,5...2 нТл для $R \approx 2,7...1,2$ тыс. км соответственно и продолжительностью 2...3 ч. Горизонтальная скорость распространения волновых возмущений геомагнитного поля была близка к 260...370 м/с. Предложена теоретическая модель волновых возмущений. Согласно модели волновые возмущения геомагнитного поля вызваны движением гравитационной волны, сгенерированной в атмосфере падающим космическим телом, и возникшими перемещающимися ионосферными возмущениями. Расчетные значения амплитуд волновых возмущений составляли 0,6...1,8 нТл для $R \approx 2,7...1,2$ тыс. км соответственно. Результаты наблюдений и оценок хорошо согласуются между собой. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 23 назв.

Ключевые слова: геомагнитное поле, Челябинский метеороид, волновые возмущения, параметры возмущений, теоретическая модель.

Существование магнитного эффекта метеоров было предсказано еще в середине XX в. (например, [1]). Первые наблюдения этого эффекта описаны автором работ [2, 3]. Магнитный эффект крупных космических тел (с диаметром более 1...10 м) существенно отличается механизмами возникновения эффекта от возмущений геомагнитного поля, вызванного мелкими метеорами. Заметим, что падение крупных метеороидов (малых астероидов) сопровождается генерацией ударной волны и, как правило, взрывом космического тела на относительно небольших высотах (~5...30 км). Кроме того, падение крупных космических тел приводит к выбросу на высоты в сотни километров нагретой высокоскоростной (скорость ~1...10 км/с) струи плазмы, называемой плюмом (например, [4, 5]). Мелкие метеоры, сгорая в метеорной зоне (высоты 80...120 км), не способны генерировать ударные волны.

К значительному возмущению геомагнитного поля привело падение Тунгусского тела. Величина возмущения поля на расстоянии около 1 000 км от места взрыва достигала 67 нТл, а продолжительность магнитного эффекта составляла около 3...4 ч (например, [4, 6–9]).

Предложен ряд возможных механизмов, ответственных за магнитный эффект крупных космических тел (например, [7–18]). Некоторые из них представляют только исторический интерес [10–15]. Назовем механизмы, не потерявшие своей актуальности [4, 5, 16–18]: возмущение системы ионосферных токов [7–9, 18], образование дипольного момента в вытянутом плазменном следе [17], диамагнитное возмущение, вы-

званное ударной волной [11, 17] и магнитогидродинамический эффект плюма [4, 5]. Все эти механизмы могут вносить свой вклад в магнитный эффект крупных космических тел. Каждый из механизмов способен привести к возмущению геомагнитного поля со своими пространственно-временными масштабами.

До настоящего времени нет единого мнения о главном механизме, приводящем к генерации геомагнитного возмущения крупным космическим телом, строгой теории этого механизма. Это связано прежде всего с отсутствием наблюдательных данных. Фактически мы располагаем лишь одним измерением геомагнитного эффекта столетней давности, вызванного падением Тунгусского тела. Подобные метеороиды вторгаются в атмосферу Земли один раз в 300...1 000 лет. Значительно чаще вторгаются метеороиды метрового масштаба. Ярким примером такого космического тела было падение Витимского болида, вызвавшего геомагнитный эффект [19, 20]. Метеороиды размером 10...20 м сталкиваются с нашей планетой один раз в 10...100 лет соответственно [20]. Таким метеороидом было Челябинское космическое тело. Представляет интерес всестороннее изучение магнитного эффекта, вызванного падением Челябинского метеороида.

Целью настоящей работы является изложение результатов магнетометрических наблюдений возмущений геомагнитного поля, последовавших за пролетом и взрывом Челябинского метеороида.

1. Общие сведения. В работе [21] оценены основные физические эффекты, сопровождавшие падение Челябинского метеороида.

При этом использовалась теория, изложенная в книге [20]. Показано, что основное энерговыделение величиной около 0,2 Мт тринитротолуола имело место вблизи высоты 25 км, где скорость потери массы была порядка 10 кг/с, энергия оптического излучения достигала нескольких сотен тераджоулей. Предсказано, что падение тела должно было привести к возмущению не только нижней и верхней атмосферы, но также магнитного поля на расстоянии не менее нескольких тысяч километров от места падения [14].

Представляет несомненный интерес поиск возмущений в магнитном поле на значительных удалениях от места падения Челябинского метеорита. Как известно, его вторжение в атмосферу Земли произошло неожиданно, поэтому целенаправленные измерения всего комплекса физических эффектов падения космического тела во всех средах (во всех геосферах) оказались невозможными. Часть эффектов зарегистрировано «дежурными» средствами, а именно сетью магнито-метров, которая позволяет проводить практически непрерывный мониторинг вариаций геомагнитного поля почти в глобальных масштабах.

2. Средства и методы. Для анализа временных вариаций привлекались данные сети магнетометров «*Intermagnet*» на станциях Новосибирск, Алма-Ата, Киев и Львов. Временное разрешение – 1 мин, минимальное значение уровня флуктуаций компонент геомагнитного поля – около 0,1 нТл. Анализу подлежали регистрации, полученные 12...18 февраля 2013 г. В работе описаны вариации уровня горизонтальной компоненты (H -компоненты), которая сильнее всего изменялась после пролета Челябинского метеороида, в интервале времени 00:00...12:00 UT (здесь и далее используется всемирное время).

3. Состояние космической погоды контролировалось при помощи измерений концентрации n_{sw} , скорости V_{sw} , температуры T_{sw} солнечного ветра, выполненных на искусственном спутнике Земли *ACE*, расчетных значений давления p_{sw} солнечного ветра, спутниковых измерений компонент B_y и B_z межпланетного магнитного поля и индексов геомагнитной активности, таких как AE , D_{st} и K_p (рис. 1). Видно, что в первой половине суток 12 февраля 2013 г. значения n_{sw} , V_{sw} , T_{sw} и p_{sw} соответствовали невозмущенному состоянию космической погоды. Примерно после 08:00 12 февраля 2013 г. значения n_{sw} флуктуируя, увеличились примерно от 10^6 до 10^7 м⁻³. Повышенные значения n_{sw} наблюдались и с 13 по 17 февраля 2013 г. Временные вариации $p_{sw}(t)$ в основном отслеживали вариации $n_{sw}(t)$, поскольку

значения T_{sw} изменялись не более чем на 100 %. Уровень компоненты B_z заметно (в пределах 10 нТл) изменялся 13...14 февраля, во второй половине суток 16 и 17 февраля 2013 г., 12, 15 и в первой половине суток 16 февраля 2013 г. уровень флуктуаций B_z был в пределах ± 1 нТл. В результате изменений знака B_z 13 и 14 февраля, во второй половине суток 16 и 17 февраля 2013 г. наблюдались слабые магнитные бури. Об этом свидетельствуют всплески значений индексов AE (до 600...900 нТл), K_p (до 3...4) и D_{st} до -100 нТл, а также данные сети наземных магнетометров.

В первых половинах суток 12, 15 и 16 февраля 2013 г. магнитные возмущения, связанные с активностью Солнца, были минимальными ($AE \leq 100$ нТл, $K_p \approx 0...1$, $D_{st} \approx -(20...30)$ нТл). По этой причине в качестве контрольных выбраны первые половины суток 12 и 16 февраля 2013 г. Спокойное состояние космической погоды в первой половине суток 15 февраля 2013 г. позволило выделить возмущения геомагнитного поля, связанные с пролетом Челябинского космического тела.

4. Вариации геомагнитного поля. Приведем результаты наблюдений за вариациями геомагнитного поля, зарегистрированных сетью магнетометров. Поскольку 13 и 14 февраля 2013 г. имело место возмущение геомагнитного поля, вызванное усилением солнечной активности, эти дни не могли использоваться в качестве контрольных дней.

Станция Новосибирск. 12 и 16 февраля 2013 г. временные вариации H -компоненты главного магнитного поля Земли в интервале времени были примерно одинаковыми (рис. 2). С 00:00 до 02:00 имело место незначительное увеличение уровня H -компоненты, с 02:00 до 06:00...08:00 наблюдалось ее уменьшение примерно на 5...10 нТл, далее регистрировалось увеличение уровня на 5...10 нТл. В интервале времени 10:00...12:00 вариации уровня геомагнитного поля были выражены слабо.

Описанные выше вариации были типичными для утреннего и дневного времени суток.

15 февраля 2013 г. примерно до 04:30 вариации H -компоненты были примерно такими же, как и в контрольные дни. После 04:30...04:40 возникло квазипериодическое колебание с амплитудой 1,5...2 нТл, периодом $T \approx 30...40$ мин и продолжительностью $\Delta T \approx 2,5$ ч (рис. 2). Примерно такие же колебания наблюдались и в уровнях Z -компоненты и модуля вектора индукции геомагнитного поля F . В контрольные дни такие колебания в уровнях Z -компоненты и модуля F отсутствовали.

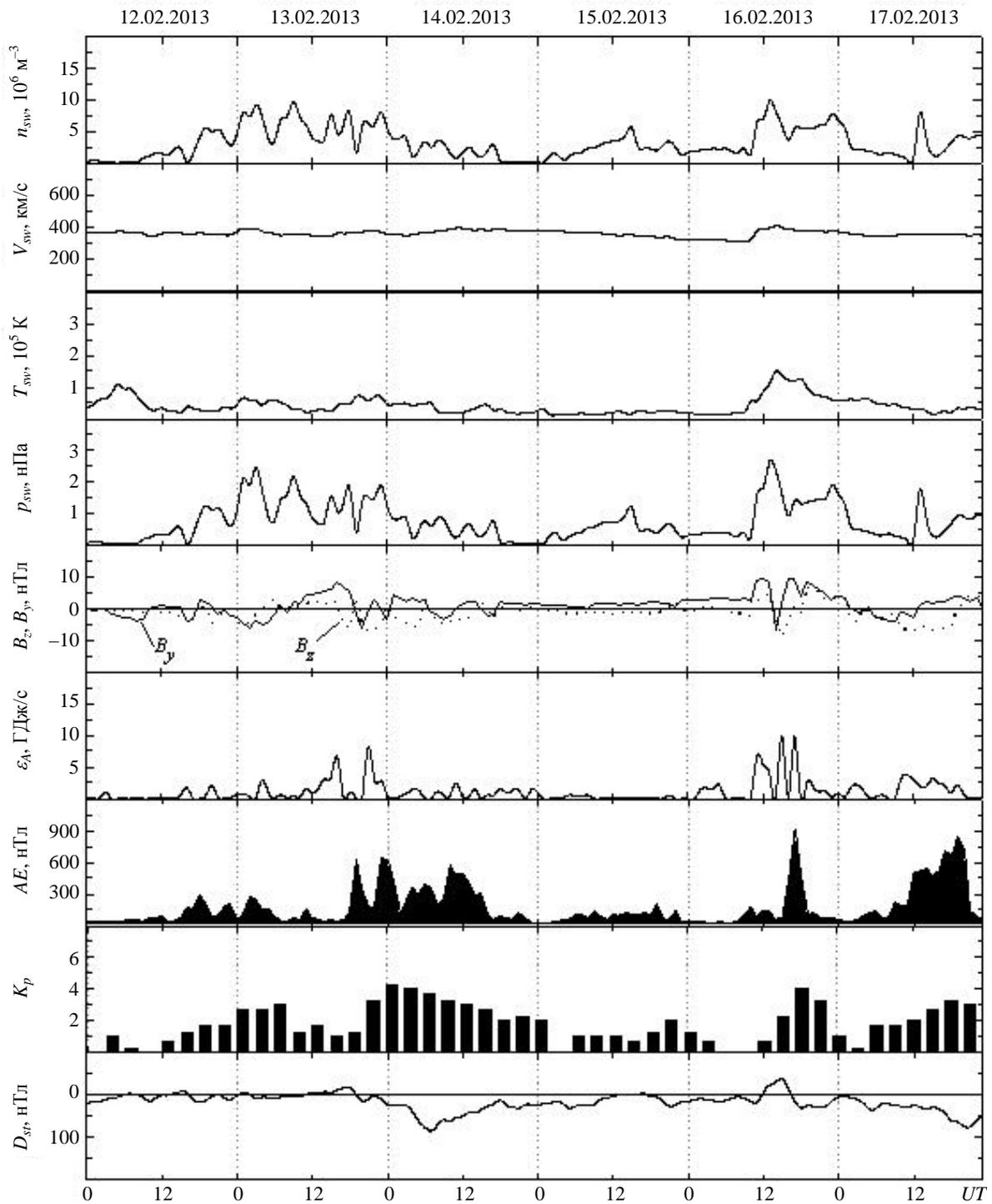


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра: концентрации n_{sw} , радиальной скорости V_{sw} , температуры T_{sw} и рассчитанных значений динамического давления p_{sw} , B_y -(линия) и B_z -(точки) компонент межпланетного магнитного поля, рассчитанных значений энергии ϵ_A , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени, AE -индекса, K_p -индекса, D_{st} -индекса в течение 12–17 февраля 2013 г.

Станция Алма-Ата. Временные вариации уровня H -компоненты геомагнитного поля 12 и 16 февраля были примерно одинаковыми (рис. 3). С 00:00 до 01:00...02:00 наблюдалось уменьшение уровня с 4 до 0 нТл, далее в течение примерно 2 ч

отмечался его рост от 0 до 4...5 нТл. Примерно до 05:00...05:30 уровень оставался неизменным, далее регистрировалось его уменьшение от 5 до -(8...10) нТл. После 09:00...09:30 уровень H -компоненты опять увеличивался на 5...10 нТл.

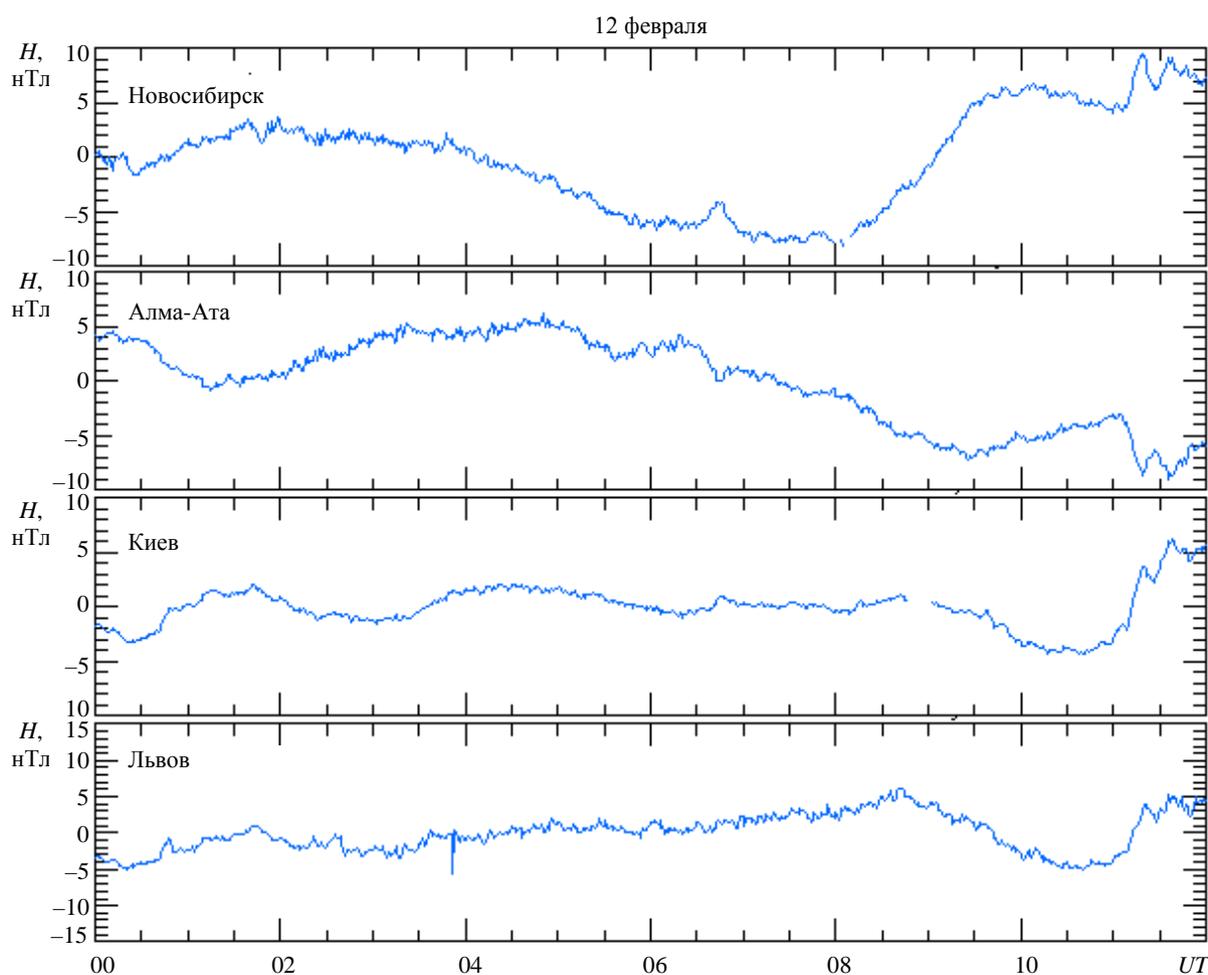


Рис. 2. Временные вариации уровня горизонтальной компоненты геомагнитного поля 12 февраля 2013 г.

В день падения Челябинского метеорита поведение $H(t)$ было другим. Примерно в 04:45...05:00 возник квазипериодический процесс с периодом около 30 мин и изменяющейся амплитудой 0,5...1,5 нТл, а затем 1,5...0,5 нТл. Длительность процесса была около 3 ч.

Вариации параметров D , Z и F геомагнитного поля 12, 15 и 16 февраля отличались незначительно.

Станция Киев. 12 февраля 2013 г. в интервале времени 00:00...11:00 изменения уровня H -компоненты геомагнитного поля отмечались в интервале от -6 до $+2$ нТл (рис. 4).

16 февраля 2013 г. примерно с 00:30 до 06:30 наблюдался медленный рост уровня H -компоненты, с 06:30 до 08:00 он оставался практически неизменным, далее отмечалось уменьшение уровня от $+8$ до -8 нТл.

В день пролета Челябинского тела в интервале времени 00:00...05:20 изменения уровня H -компоненты были незначительными (до ± 1 нТл). После 05:20 возникло квазипериодическое изме-

нение уровня H -компоненты с периодом 30...40 мин, амплитудой около 1 нТл и продолжительностью около 2,5...3 ч.

Станция Львов. Временные вариации уровня H -компоненты в контрольные дни 12 и 16 февраля 2013 г. в целом были похожими: сначала в течение 6...8 ч отмечалось увеличение уровня примерно от -5 до $+5$ нТл, в интервале времени 09:00...11:00 наблюдалось его уменьшение примерно на 10 нТл (рис. 4).

15 февраля с 00:00 до 05:45 флуктуации уровня H -компоненты были незначительными (не более ± 2 нТл). В интервале времени 05:45...06:00 уровень возрос на 5...6 нТл, отмечался квазипериодический процесс с $T \approx 30$ мин, амплитудой 0,5...1,0 нТл и длительностью ΔT около 2 ч. Примерно такие же вариации наблюдались и в Z -компоненте. Значительные вариации уровня H -компоненты (от $+4$ до -2 нТл) регистрировались с 08:00 до 12:00. На медленные изменения уровня накладывались более быстрые флуктуации с характерным временем замираний 10...20 мин.

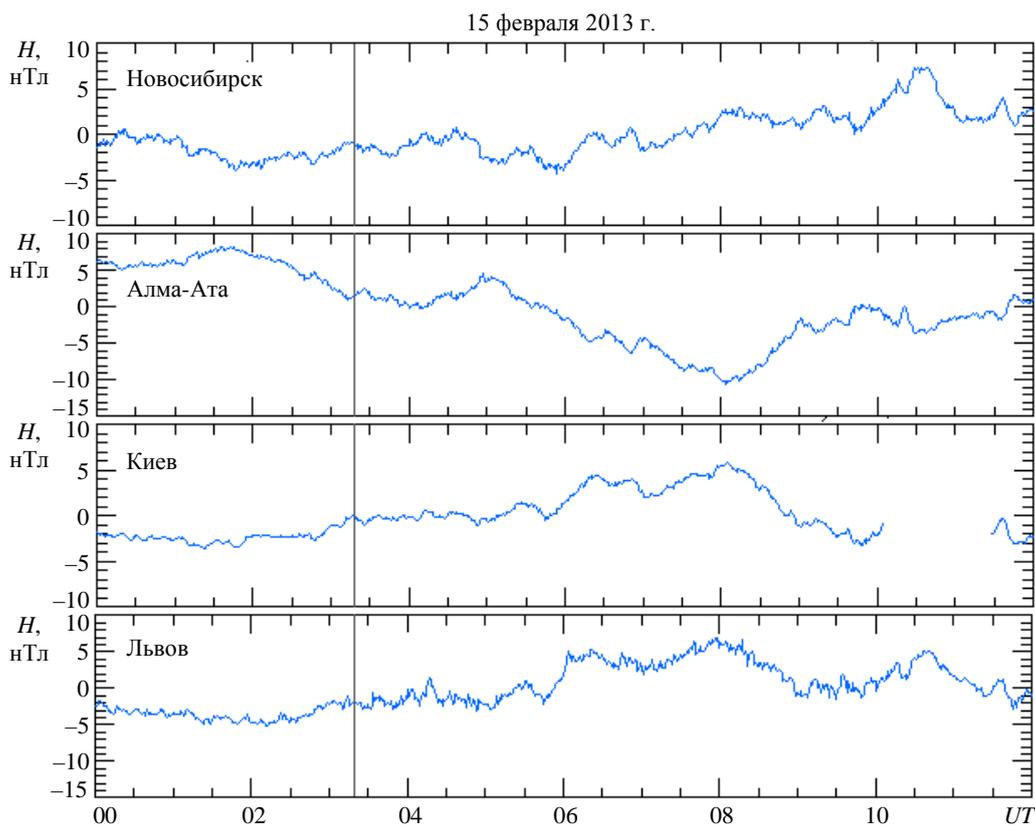


Рис. 3. Временные вариации уровня горизонтальной компоненты геомагнитного поля 15 февраля 2013 г.

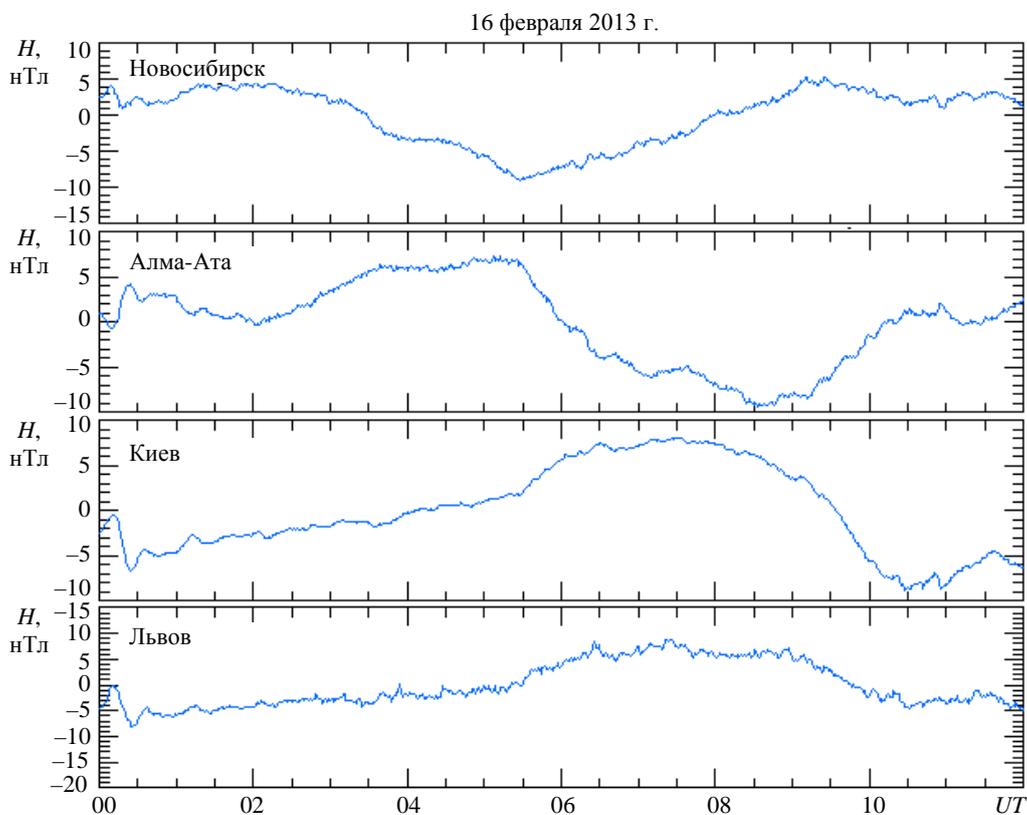


Рис. 4. Временные вариации уровня горизонтальной компоненты геомагнитного поля 16 февраля 2013 г.

5. Обсуждение. В день падения метеорита «Челябинск» с временем запаздывания $\Delta t = 70...160$ мин на расстояниях $R \approx 1\ 160...2\ 700$ км соответственно возникли квазипериодические вариации H -компоненты геомагнитного поля (таблица). Линейный рост Δt с ростом R убедительно свидетельствует в пользу того, что возмущения распространялись от места падения метеороида. Скорее всего, они были вызваны волновым возмущением в атмосфере Земли, сгенерированным падением космического тела. Оценим горизонтальную скорость распространения волновых возмущений, используя очевидное соотношение

$$v = \frac{R}{\Delta t - \Delta t_0}, \quad (1)$$

где Δt_0 – время распространения возмущения от места взрыва метеороида до высоты генерации геомагнитного возмущения. Источником генерации последних, скорее всего, является ионосферный ток на высотах динамо-области ионосферы, промодулированный волной плотности, вызванной пролетом и взрывом метеороида. До высот 100...150 км волна от места взрыва доходит за время $\Delta t_0 \approx 4...6$ мин. Полагая, что в среднем $\Delta t_0 \approx 5$ мин, из (1) оценим скорость v . Результаты оценок приведены в таблице.

Основные параметры, описывающие геомагнитные возмущения

Параметр	Новосибирск	Алма-Ата	Киев	Львов
R , км	1160	1760	2150	2700
Δt , мин	70...80	85...100	120	145...160
v , м/с	260...300	310...370	310	290...320
ΔT , ч	2,5	3	2,5...3	2
ΔH , нТл	1,5...2	1...1,5	1	0,5...1
T , мин	30...40	30	30...40	30
ΔB , нТл	1,5...1,9	1,1...1,5	0,8...1,2	0,6...1
j_0 , А/м ²	$(4...5) \cdot 10^{-7}$	$(3...4) \cdot 10^{-7}$	$(2...3) \cdot 10^{-7}$	$(1,5...2,5) \cdot 10^{-7}$

Оказалось, что $v \approx 260...370$ м/с. Волновые возмущения с периодом $T = 30...40$ мин и $v \approx 260...370$ м/с связаны с генерацией космическим телом гравитационной волны в атмосфере Земли. При этом на высотах динамо-области ионосферы относительное изменение давления воздуха $\delta_p = \delta p/p \sim 10...100$ % при $R \sim 1000...100$ км соответственно [21]. Концентрация электронов N , являясь малой примесью на высотах 100...150 км, также модулируется с тем же периодом и примерно с той же относительной амплитудой $\delta_N = \delta N/N \sim 10...100$ %. Волна ионизированной компоненты атмосферы распространяется во все стороны от эпицентра взрыва в горизонтальном направлении. Так возникают перемещающиеся ионосферные возмущения. Их горизонтальная скорость v при $T \gg T_B \approx 5$ мин (T_B – период Брента-Вяйсяля) примерно на 10 % меньше скорости звука v_s [22]:

$$v = \frac{2\sqrt{\gamma-1}}{\gamma} v_s \approx 0,9v_s,$$

$$v_s = \sqrt{\gamma \frac{kT_n}{M_n}},$$

где γ – показатель адиабаты; k – постоянная Больцмана; T_n – температура нейтралов; M_n – их масса. При $\gamma = 1,4$, $M_n \approx 4,6 \cdot 10^{-26}$ кг, $T_n \approx 250...400$ К

(динамо-область) имеем $v_s \approx 320...410$ м/с, а $v \approx 290...370$ м/с.

Оценим далее амплитуду геомагнитного возмущения. Из роторного уравнения Максвелла

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \Delta \vec{j}$$

следует оценка амплитуды возмущения индукции магнитного поля ΔB (например, [21])

$$\Delta B \approx \mu_0 \Delta j \Delta z. \quad (2)$$

Здесь μ_0 – магнитная постоянная; Δj – амплитуда возмущения плотности ионосферного тока в динамо-области ионосферы; Δz – толщина этой области. Полагая, что

$$\Delta j = j_0 \delta_N, \quad (3)$$

из (2) и (3) получим

$$\Delta B \approx \mu_0 j_0 \delta_N \Delta z, \quad (4)$$

где j_0 – невозмущенное значение плотности тока. Результаты оценок по соотношению (4) приведены в таблице. Считалось, что $\delta_N = 10$ %, $\Delta z = 30$ км. Значения j_0 задавались для соответствующего времени суток. В дневное время (станция Новосибирск) значения j_0 примерно в 2 раза больше, чем вскоре после восхода Солнца (станции Киев и Львов). Из таблицы видно, что оцененные значения ΔB очень близки к измеренным значе-

ниям ΔH . Это подтверждает правильность предложенной модели генерации возмущений ΔH . Об этом свидетельствует и близость рассчитанной (290...370 м/с) и оцененной (260...370 м/с) из наблюдательных данных скорости распространения волновых возмущений.

Таким образом, наблюдаемые волновые возмущения геомагнитного поля обусловлены падением Челябинского метеороида. Аперриодический магнитный эффект (в отличие от аналогичного эффекта Тунгусского тела) был выражен слабо. Это объясняется малостью эффекта плюма, вызванного Челябинским космическим телом.

Выводы. Проведен анализ временных вариаций компонент геомагнитного поля в день падения метеорита «Челябинск» и в контрольные дни. Для анализа выбраны магнитные обсерватории в г. Новосибирск, Алма-Ата, Киев и Львов. Расстояние R от места взрыва до обсерватории изменялось в пределах 1,2...2,7 тыс. км. Оказалось, что пролет и взрыв Челябинского космического тела сопровождался вариациями в основном горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Вариации носили квазипериодический характер с периодом 30...40 мин, амплитудой 0,5...2 нТл для $R \approx 2,7...1,2$ тыс. км соответственно и продолжительностью 2...3 ч. Горизонтальная скорость распространения волновых возмущений геомагнитного поля была близка к 260...370 м/с. Предложена теоретическая модель волновых возмущений. Согласно модели волновые возмущения геомагнитного поля вызваны движением гравитационной волны, сгенерированной в атмосфере падающим космическим телом, и возникшими при этом перемещающимися ионосферными возмущениями. Расчетные значения амплитуд волновых возмущений составляли 0,6...1,8 нТл для $R \approx 2,7...1,2$ тыс. км соответственно. Результаты наблюдений и оценок хорошо согласуются между собой.

Библиографический список

1. Астапович И. С. Метеорные явления в атмосфере Земли / И. С. Астапович. – М.: Физматгиз, 1958. – 634 с.
2. Калашников А. Г. О наблюдении магнитного эффекта метеоров индукционным методом / А. Г. Калашников // Докл. АН СССР. – 1949. – 66, № 3. – С. 373–376.
3. Калашников А. Г. Магнитный эффект метеоров / А. Г. Калашников // Изв. АН СССР. Геофиз. – 1952. – Вып. 6. – С. 7–20.
4. Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчинова. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 310 с.
5. Ковалев А. Т. Ионосферные и магнитосферные возмущения в результате падения небольших комет и астероидов / А. Т. Ковалев, И. В. Немчинов, В. В. Шувалов // Астрономический вестн. – 2006. – 40, № 1. – С. 65–76.
6. Иванов К. Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита / К. Г. Иванов // Метеоритика. – 1961. – Вып. 21. – С. 46–48.
7. Иванов К. Г. О причине последующих изменений поля в геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита / К. Г. Иванов // Геомагнетизм и аэрномия. – 1961. – 1, № 4. – С. 616–618.

8. Иванов К. Г. Геомагнитные эффекты взрывов в нижней атмосфере / К. Г. Иванов // Геомагнетизм и аэрномия. – 1962. – 2, № 1. – С. 153–160.
9. Иванов К. Г. Геомагнитный эффект Тунгусского падения / К. Г. Иванов // Метеоритика. – 1964. – Вып. 24. – С. 141–151.
10. Идлис Г. М. О кометной природе Тунгусского метеорита / Г. М. Идлис, З. В. Карягина // Метеоритика. – 1961. – Вып. 21. – С. 32–43.
11. Обашев Г. О. О геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита / Г. О. Обашев // Метеоритика. – 1961. – Вып. 21. – С. 49–52.
12. Ковалевский А. Ф. К вопросу о механизме геомагнитных эффектов крупных взрывов / А. Ф. Ковалевский // Тр. Сиб. физ.-техн. ин-та при Томском ун-те. – 1962. – Вып. 41. – С. 87–91.
13. Ковалевский А. Ф. Магнитный эффект взрыва Тунгусского метеорита / А. Ф. Ковалевский // Проблема Тунгусского метеорита. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1963. – С. 187–194.
14. Золотов А. В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г. / А. В. Золотов. – Минск: Наука и техника, 1969. – 202 с.
15. Гольдин В. Д. Об интерпретации некоторых геофизических явлений, сопровождавших падение Тунгусского метеорита / В. Д. Гольдин // Космическое вещество и Земля. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1986. – С. 44–62.
16. Бронштэн В. А. Тунгусский метеорит: история исследования / В. А. Бронштэн. – М.: А. Д. Сельянов (изд.). – 2000. – 322 с.
17. Бронштэн В. А. Магнитный эффект Тунгусского метеорита / В. А. Бронштэн // Геомагнетизм и аэрномия. – 2002. – 42, № 6. – С. 854–856.
18. Иванов К. Г. Еще раз о проблеме моделирования геомагнитного эффекта Тунгусского падения / К. Г. Иванов // Геомагнетизм и аэрномия. – 2002. – 42, № 6. – С. 857–858.
19. Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского боида 24 сентября 2002 г. // Геомагнетизм и аэрномия. – 2011. – 51, № 1. – С. 119–132.
20. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф / Л. Ф. Черногор. – Х.: Харьков. нац. ун-т им. В. Н. Каразина, 2012. – 556 с.
21. Chernogor L. F. Physical effects of Chelyabinsk meteorite in the atmosphere and geospace / L. F. Chernogor // Intern. Conf. Astronomy and Space Physics: book of abstracts. – Kyiv, 2013. – P. 82–84.
22. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. / Е. И. Григоренко, С. В. Лазоренко, В. Н. Таран, Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрномия. – 2003. – 43, № 6. – С. 770–787.

Рукопись поступила 18.06.2013 г.

L. F. Chernogor

LARGE-SCALE DISTURBANCES IN THE EARTH'S MAGNETIC FIELD ASSOCIATED WITH THE CHELYABINSK METEORITE EVENT

Variations in the geomagnetic field components acquired during the Chelyabinsk meteorite event on February 15, 2013 and on reference days (February 12, 2013 and February 16, 2013) have been analyzed. The magnetometers chosen for study are located at Novosibirsk City, Alma-Ata City, Kyiv City, and Lviv City. The distance between the site of the meteor blast and a magnetometer varies from 1,200 km to 2,700 km. The passage and explosion of the Chelyabinsk meteor observed to be associated with the variations mainly in the horizontal component of the geomagnetic field. The magnetic field varied quasi-periodically with 30...40-min periods and 0.5...2-nT amplitudes for distances of 2,700...1,200 km, respectively, and with 2...3-hr durations. The horizontal velocity of the wave disturbances was approximately equal to 260...370 m s⁻¹. A theoretical model of the wave distur-

ances has been developed. The model suggests that the geomagnetic field disturbances are caused by the acoustic gravity wave generated in the atmosphere by the falling meteoroid and associated with them traveling ionospheric disturbances. The calculated magnitudes of the wave disturbances are equal to 0.6...1.8 nT at distances of 2,700...1,200 km, respectively. The observations and the estimates are in good agreement.

Key words: geomagnetic field, Chelyabinsk meteoroid, wave disturbances, disturbance parameters, theoretical model.

Л. Ф. Черногор

ВЕЛИКОМАСШТАБНІ ЗБУРЕННЯ
МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ,
ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИ ПАДІННЯ
ЧЕЛЯБІНСЬКОГО МЕТЕОРОЇДА

Проведено аналіз часових варіацій компонент геомагнітного поля у день падіння метеорита «Челябінськ»

(15 лютого 2013 р.) та в контрольні дні (12 і 16 лютого 2013 р.). Для аналізу вибрано магнітні обсерваторії у м. Новосибірськ, Алма-Ата, Київ і Львів. Відстань R від місця вибуху до обсерваторії змінювалось у межах 1,2...2,7 тис. км. Виявилось, що проліт і вибух Челябінського космічного тіла супроводжувалися варіаціями в основному горизонтальній компоненті геомагнітного поля. Варіації носили квазіперіодичний характер з періодом 30...40 хв, амплітудою 0,5...2 нТл для $R \approx 2,7...1,2$ тис. км відповідно та тривалістю 2...3 год. Горизонтальна швидкість поширення хвильових збурень геомагнітного поля була близька до 260...370 м/с. Запропоновано теоретичну модель хвильових збурень. Згідно моделі хвильові збурення геомагнітного поля викликані рухом гравітаційної хвилі, що була згенерована в атмосфері падаючим космічним тілом, та рухомими іоносферними збуреннями, що виникли. Розрахункові значення амплітуд хвильових збурень склали 0,6...1,8 нТл для $R \approx 2,7...1,2$ тис. км відповідно. Результати спостережень і оцінок добре узгоджуються між собою.

Ключові слова: геомагнітне поле, Челябінський метеороїд, хвильові збурення, параметри збурень, теоретична модель.