

УДК 550.385.37:550.388

ЭФФЕКТЫ ЛИПЕЦКОГО МЕТЕОРОИДА В ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2020 г. Л. Ф. Черногор*

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,
г. Харьков, Украина

*e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

Поступила в редакцию 26.03.2019 г.

После доработки 17.05.2019 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

С использованием данных наблюдений магнитных обсерваторий Киев (Украина), Борок, Санкт-Петербург, Хель (Польша), Арти, Новосибирск, Алма-Ата (Республика Казахстан) и Иркутск проведен анализ временных вариаций компонент геомагнитного поля в день падения Липецкого метеороида (21 июня 2018 г.) и в контрольные дни (20 и 22 июня 2018 г.). Расстояние r от места взрывоподобного выделения энергии метеороидом до обсерваторий изменялось от 0.584 до 4.324 Мм. Оказалось, что пролет в магнитосфере и атмосфере Липецкого метеороида сопровождался вариациями, в основном, H -компоненты геомагнитного поля. Магнитный эффект наблюдался за 54–56 мин до взрыва метеороида, амплитуда возмущений геомагнитного поля не превышала 0.5–1 нТл, длительность – ~25 мин. После взрыва метеороида с временем запаздывания от 6–8 до 13–14 мин для R от 0.584 до 4.324 Мм наблюдались знакопеременные (сначала положительный, затем отрицательный) всплески в H -компоненте поля. Амплитуда всплеска убывала от 3.75 до 1.1 нТл при увеличении R от 0.584 до 4.324 Мм. Продолжительность магнитного эффекта при этом изменялась для всех расстояний в пределах 15–20 мин. Предложены теоретические модели наблюдаемых магнитных эффектов и проведены их теоретические оценки. Результаты наблюдений и оценок хорошо согласуются между собой.

DOI: 10.31857/S0016794020030037

1. ВВЕДЕНИЕ

Первые наблюдения магнитного эффекта метеоров приведены в работах [Калашников, 1949, 1952]. Этот эффект был объяснен еще в середине XX века [например, Астапович, 1958]. Механизмы магнитного эффекта крупных космических тел (с диаметром 1–10 м и более) существенно отличаются от механизмов возмущений геомагнитного поля, производимых метеорами на ионосферных высотах. Дело в том, что падение и взрыв крупных метеороидов и астероидов сопровождается генерацией мощной ударной волны на атмосферных высотах. Кроме того, падение достаточно крупных космических тел сопровождается выбросом на ионосферные высоты высокоскоростной (скорость ~1–10 км/с) высокотемпературной (~1000 К) струи плазмы, получившей название плюма [Катастрофические ..., 2005; Ковалев и др., 2006; Catastrophic ..., 2008, Черногор, 2018a].

Только через полвека после падения Тунгусского космического тела был обнаружен и описан магнитный эффект, вызванный пролетом и взрывом этого тела [Иванов, 1961a]. Амплитуда возму-

щения геомагнитного поля, зарегистрированная в Иркутской обсерватории на расстоянии ~1000 км от места взрыва, достигала 67 нТл, а продолжительность магнитного эффекта составляла 3–4 ч [например, Иванов, 1961a, 1961б, 1962, 1964; Катастрофические ..., 2005; Catastrophic ..., 2008].

Рядом авторов предложены физические механизмы, которые могли вызвать магнитный эффект Тунгусского тела [например, Иванов, 1961б, 1962, 1964, 2002; Идлис и Корягина, 1961; Обашев, 1961; Ковалевский, 1962, 1963; Золотов, 1969; Гольдин, 1986; Бронштэн, 2000, 2002]. Ряд механизмов оказались неэффективными [Идлис и Корягина, 1961; Обашев, 1961; Ковалевский, 1962, 1963; Золотов, 1969]. Перечислим механизмы аperiодических возмущений геомагнитного поля, вызванные крупными космическими телами, которые не потеряли своей актуальности: возмущение системы ионосферных токов [Иванов, 1961б, 1962, 1964, 2002], образование дипольного момента в вытянутом плазменном следе [Бронштэн, 2002], диамагнитное возмущение, вызванное ударной волной [Обашев, 1961; Бронштэн, 2002] и магнитогидродинамический эф-

фект плюма [Катастрофические ..., 2005; Ковалев и др., 2006; Catastrophic ..., 2008; Черногор, 2018a]. В принципе, все эти механизмы могут вносить свой вклад в магнитный эффект метеороидов. Каждый из перечисленных механизмов способен привести к возмущению геомагнитного поля со своими пространственно-временными масштабами.

До настоящего времени нет единого мнения о главном механизме магнитного эффекта, вызываемого крупными космическими телами. Это связано, прежде всего, с отсутствием данных наблюдений, точнее, с малым их количеством. Исследователи располагают измерениями геомагнитного эффекта Тунгусского тела. Подобные этому телу метеороиды, однако, вторгаются в земную атмосферу очень редко — один раз в 300–1000 лет [Brown et al., 2002]. Тела диаметром 10–20 м сталкиваются с Землей всего раз в 10–100 лет соответственно [Brown et al., 2002; Черногор, 2012]. Таким было уникальное событие, получившее название Челябинского метеороида. Магнитный эффект Челябинского космического тела описан автором [Черногор, 2013а, 2013б, 2013в, 2014]. В этих работах теоретически оценен магнитный эффект, проведен анализ временных вариаций компонент геомагнитного поля, зарегистрированных в обсерваториях Алма-Ата, Киев, Львов, Новосибирск и Харьков. Впервые обнаружены квазипериодические вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля в диапазоне периодов 30–40 мин с амплитудой 0.5–2 нТл на расстояниях $r \approx 2.7\text{--}1.2$ Мм соответственно и длительностью 2–3 ч.

В работе [Черногор, 2014] проанализированы временные вариации горизонтальных компонент геомагнитного поля, зарегистрированные в обсерваториях Алма-Ата, Арти, Борок, Киев, Львов, Новосибирск, Харьков и Якутск, которые сопровождали полет Челябинского космического тела. Впервые обнаружен магнитосферный эффект метеороида, который наблюдался в вариациях магнитного поля за 33–47 мин до взрыва Челябинского тела. Продолжительность эффекта составляла 25–35 мин, а амплитуда аperiodических возмущений — 1–6 нТл. Предложена модель генерации аperiodических, квазипериодических и шумоподобных вариаций геомагнитного поля, вызванных взаимодействием подлетающего метеороида с магнитосферой.

Пример геомагнитного эффекта метеороида метрового размера описан в работах [Черногор, 2011, 2012]. Явление Витимского болида сопровождалось квазипериодическими вариациями магнитного поля в диапазоне периодов $\sim 100\text{--}1000$ с, которые были зарегистрированы на расстоянии $r \approx 4.85$ Мм. Амплитуда колебаний составляла 1.5–2 нТл. Диаметр метеороида был

~ 3.2 м, а начальная кинетическая энергия — $\sim 10^{13}$ Дж ≈ 2.4 кт ТНТ. Частота падения подобных тел — 1.6 год^{-1} . Представляет значительный теоретический и практический интерес анализ результатов наблюдений падения любого достаточно крупного космического тела.

Цель настоящей работы — анализ вариаций магнитного поля, возникших при движении Липецкого метеороида в магнитосфере и атмосфере Земли, оценка и обсуждение магнитного эффекта и его механизмов. Как показывают наши оценки по соотношениям [Brown et al., 2002], частота падения подобных метеороидов составляет 0.68 год^{-1} .

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛИПЕЦКОМ МЕТЕОРОИДЕ

21 июня 2018 г. в 01:16:20 UT (здесь и далее UT — всемирное время) в районе г. Липецк (Российская Федерация) имело место вторжение в атмосферу Земли космического тела, которое естественно именовать Липецким метеороидом. Приборы, установленные на спутниках США, предназначенных для контроля космического пространства, измеряли три координаты скорости ($v_x = -8.9$ км/с, $v_y = -4.3$ км/с, $v_z = -10.5$ км/с), интегральную энергию свечения $E_r \approx 1.22 \times 10^{12}$ Дж ≈ 0.29 кт ТНТ, высоту вспышки $z_r \approx 27$ км и ее координаты: 52.8° N, 38.1° E [Center ..., 2019]. Найденные фрагменты взорвавшегося метеороида свидетельствовали о том, что космическое тело было каменным, точнее хондритом. Его плотность $\rho \approx 3.3 \text{ т/м}^3$.

Значения трех проекций скорости позволили автору вычислить угол наклона траектории к горизонту $\alpha \approx 79^\circ$ и модуль скорости $v \approx 14.4$ км/с, по эмпирической зависимости для коэффициента светимости η_r от E_r , приведенной в работе [Brown et al., 2002], вычислить $\eta_r \approx 10.4\%$ и начальную кинетическую энергию тела $E \approx 1.17 \times 10^{13}$ Дж ≈ 2.8 кт ТНТ. Зная E и v , легко можно вычислить массу метеороида $m \approx 113$ т, а по массе и плотности — объем V и диаметр d шароподобного тела. Оказалось, что $V \approx 34.2 \text{ м}^3$, $d \approx 4$ м.

3. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Для анализа временных вариаций компонент геомагнитного поля использовались данные наблюдений сети Intermagnet, полученные в обсерваториях Киев (Украина), Борок, Санкт-Петербург, Хель (Польша), Арти, Новосибирск, Алма-Ата (Республика Казахстан), Иркутск (табл. 1). Расстояние R между местом взрыва метеороида и обсерваторией изменялось в пределах от 0.584 до 4.324 Мм. Временное разрешение — 1 мин, минимальное значение уровня флуктуаций компонент геомагнитного поля — ~ 0.1 нТл. Исследовались

Таблица 1. Основные сведения об обсерваториях и параметрах магнитного эффекта Липецкого метеороида

Обсерватории	Координаты обсерватории	Расстояние R , Мм	ΔH , нТл	Δt , мин	v' , км/с	ΔT , мин
Киев	50.72° N, 30.3° E	0.584	1.2	7–8	6.5–19.4	15–20
Борок	58.07° N, 38.23° E	0.586	3.75	7–8	6.5–19.4	15–20
Санкт-Петербург	60.542° N, 29.716° E	1	3.3–3.5	7–9	6.7–33.3	15–17
Хель	54.61° N, 18.82° E	1.28	2.0	8–10	6.1–14.2	15
Арти	56.433° N, 58.567° E	1.37	1.9	8–9	9.1–15.2	15–17
Новосибирск	54.85° N, 83.23° E	2.919	~1	11–13	7.5–10.8	15–17
Алма-Ата	43.2° N, 76.9° E	3.034	1.6	11–13	7.8–10.2	15–17
Иркутск	52.27° N, 104.45° E	4.324	1.1	13–14	9.6–11.1	15–18

данные регистрации 19–23 июня 2018 г., анализировались все компоненты поля, а также производные dBx/dt , dBy/dt , dBz/dt и dBf/dt . Было найдено, что наиболее четко магнитный эффект отмечался в H -компоненте поля и в производных dBx/dt и dBy/dt . Временные вариации магнитного поля 21 июня 2018 г. и двух контрольных дней 20 и 22 июня 2018 г. обсуждаются ниже.

4. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

При анализе вариаций геомагнитного поля, вызванных любым источником, во избежание ошибок необходимо тщательное изучение состояния космической погоды. По данным ИСЗ ACE [Space ..., 2019] 17–19 июня 2018 г. в солнечном ветре наблюдалось возрастание плотности частиц солнечного ветра почти в 3 раза, скорости – почти в 2 раза и температуры частиц в 3–10 раз. В результате этого 18 июня 2018 г. в околоземном пространстве возникла слабая магнитная буря с $Kp_{\max} = 4$ и $Dst_{\min} = -35$ нТл. 21 июня 2018 г., в день падения Липецкого метеороида значения Kp -индекса не превышали 1, а Dst -индекса были порядка $-(3-4)$ нТл. Таким образом, магнитная обстановка была благоприятной для наблюдения магнитного эффекта Липецкого метеороида.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Приведем результаты анализа временных вариаций H -компоненты и производных dBx/dt и dBy/dt , предшествующих взрыву Липецкого метеороида, а также после взрыва.

5.1. Магнитный эффект при полете метеороида

Рассмотрим далее интервал времени 00:00–01:00 УТ. Обсерватории расположены в работе в порядке увеличения расстояния.

Обсерватория Киев. 20 июня 2018 г. в интервале времени 00:00–02:00 отмечались значительные (до ± 1 нТл) вариации H -компоненты. 22 июня

2018 г. в том же интервале они не превышали ± 0.2 нТл. Значения производных dBx/dt и dBy/dt 20 июня 2018 г. и 22 июня 2018 г. находились в пределах ± 0.5 и ± 0.2 нТл/мин соответственно (рис. 1а, 1б).

21 июня 2018 г. в интервале времени от 00:21 до 00:36–00:53 наблюдались знакопеременные вариации dBx/dt и dBy/dt , амплитуда которых достигала 0.4 нТл/мин. Двухфазные вариации с амплитудой $\Delta H \approx 0.5$ нТл отмечались в интервале времени 00:22–00:32 (рис. 1б).

Обсерватория Борок. Амплитуда вариаций H -компоненты 20 и 22 июня 2018 г. не превышала соответственно 2 и 0.5 нТл. Производные dBx/dt и dBy/dt флуктуировали в пределах ± 1 и ± 0.5 нТл/мин соответственно (рис. 2а, 2в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 00:20–00:45 отмечались двухфазные вариации H -компоненты с амплитудой 0.5 нТл. В интервале времени от 00:20–00:25 до 00:38–00:55 регистрировались вариации производных в пределах ± 0.5 и $\pm 0.6-0.7$ нТл/мин соответственно (рис. 2б).

Обсерватория Санкт-Петербург. 20 и 22 июня 2018 г. значения H -компоненты флуктуировали в пределах ± 2 и ± 0.6 нТл соответственно. Флуктуации уровня производных не превышали ± 1 нТл/мин (рис. 3а, 3в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 00:21–00:45 регистрировались знакопеременные вариации уровня H -компоненты с амплитудой ~ 0.5 нТл. Амплитуда флуктуаций производных достигала 0.5 и 0.9 нТл/мин соответственно. Продолжительность этих флуктуаций была $\sim 15-20$ мин (рис. 3б).

Обсерватория Хель. 20 и 22 июня 2018 г. амплитуда вариаций H -компоненты не превышала 1.8 и 0.2 нТл соответственно. Значения производных флуктуировали в пределах ± 0.6 и ± 0.5 нТл/мин (рис. 4а, 4в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 00:21–00:50 наблюдались знакопеременные вариации уровня H -компоненты с амплитудой ~ 0.5 нТл.

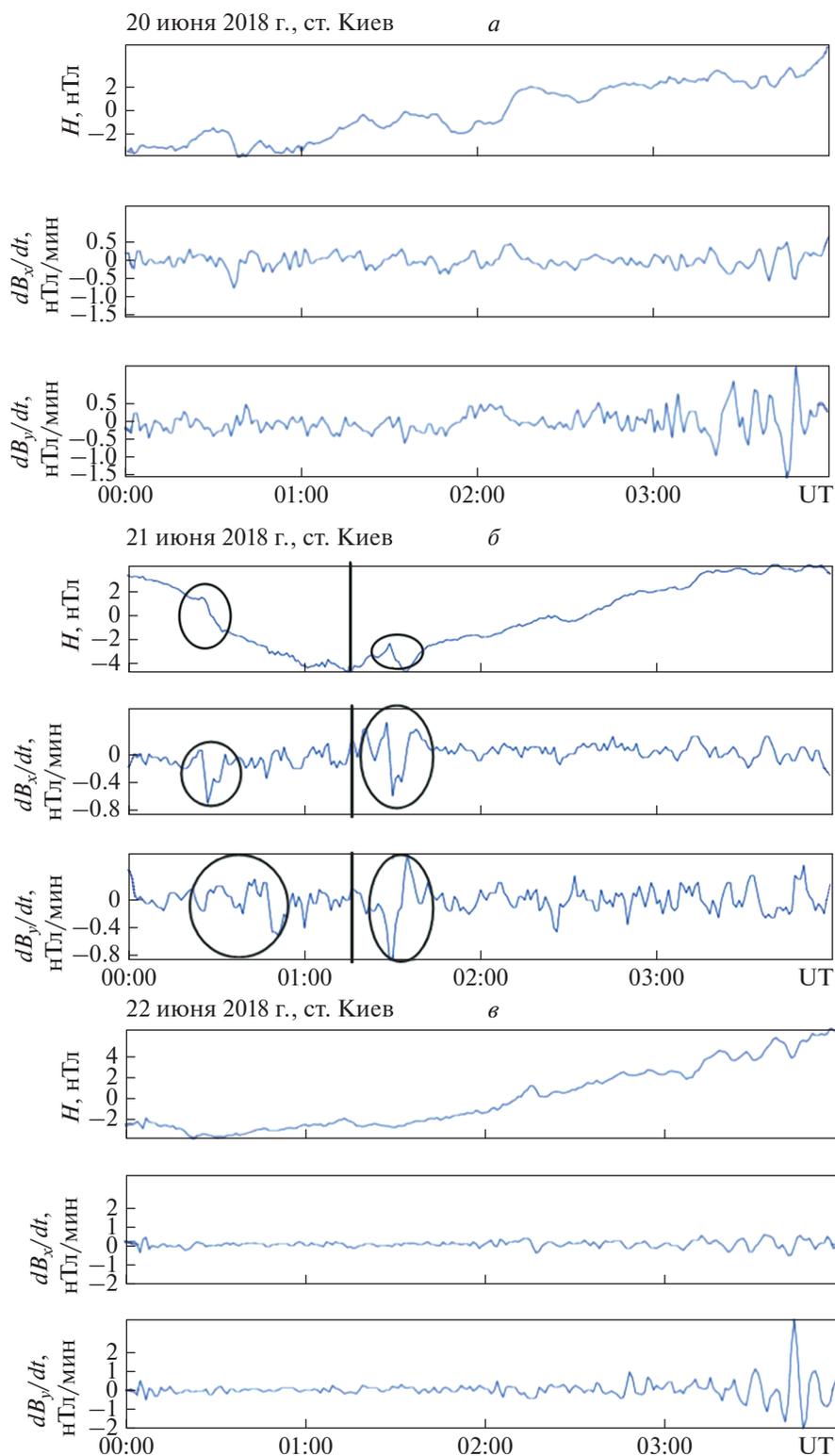


Рис. 1. Временные вариации H -компоненты и производных B_x и B_y геомагнитного поля, зарегистрированные на станции Киев. Прямой линией показан момент взрыва Липецкого метеороида, эллипсами обозначены возможные магнитосферный и ионосферный эффекты подлета и взрыва космического тела. Расстояние $R = 0.584$ Мм.

Значения производных варьировались в пределах ± 0.5 и ± 0.7 нТл/мин соответственно (рис. 4б).

Обсерватория Арти. 20 и 22 июня 2018 г. флуктуации уровня H -компоненты не превышали

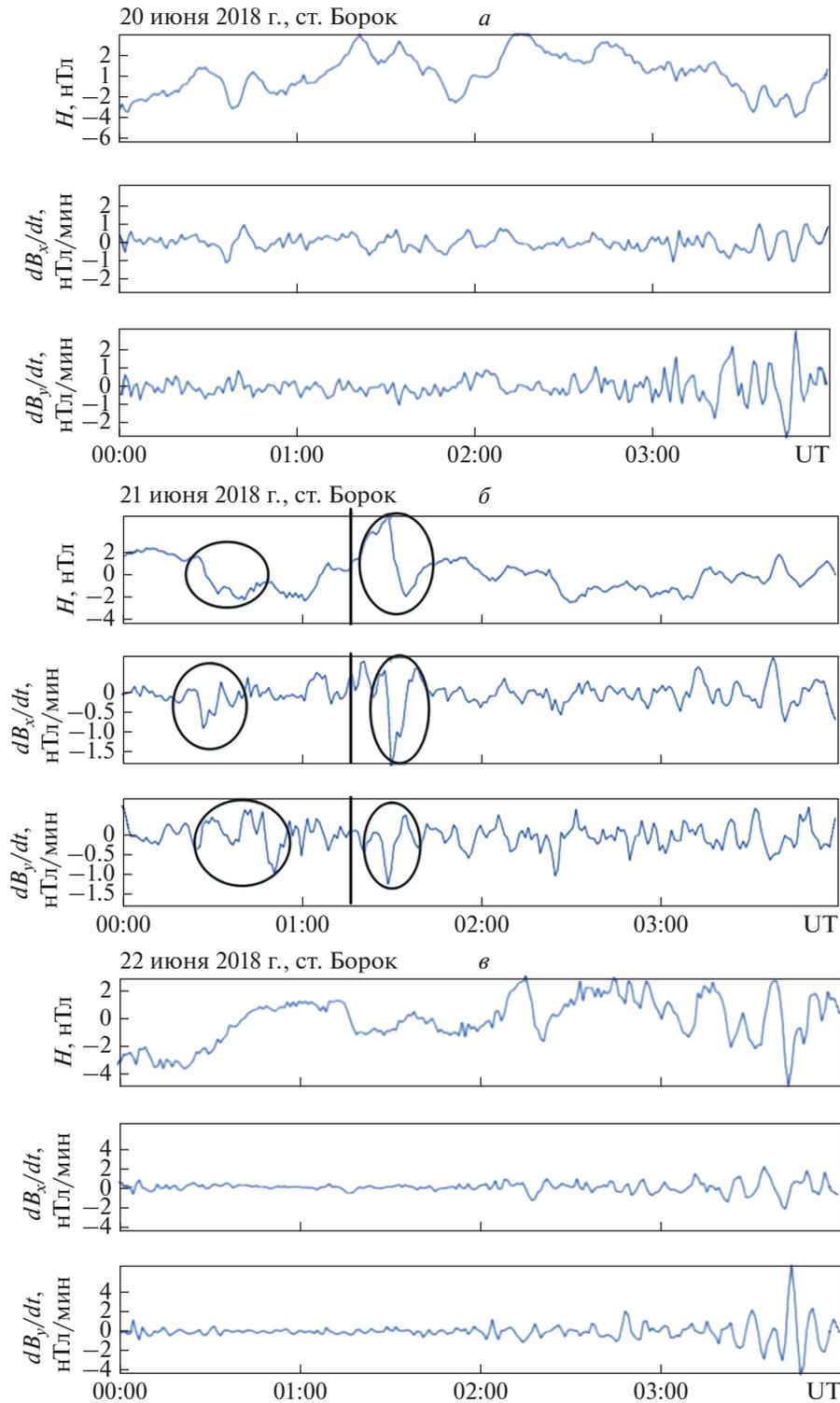


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для ст. Борок. Расстояние $R = 0.586$ Мм.

± 0.5 нТл, а флуктуации уровня производной $dBx/dt - \pm 0.4$ и ± 0.2 нТл/мин (рис. 5а, 5в).

21 июня 2018 г. с 00:21 до 01:15 отмечались значительные флуктуации уровня H -компоненты с амплитудой до 1.1–1.2 нТл. Амплитуда

флуктуаций производной dBx/dt достигала 0.5 нТл/мин (рис. 5б).

Обсерватория Новосибирск. 20 и 22 июня 2018 г. амплитуда вариаций уровня H -компоненты не превышала 0.8 и 0.7 нТл соответственно. Значе-

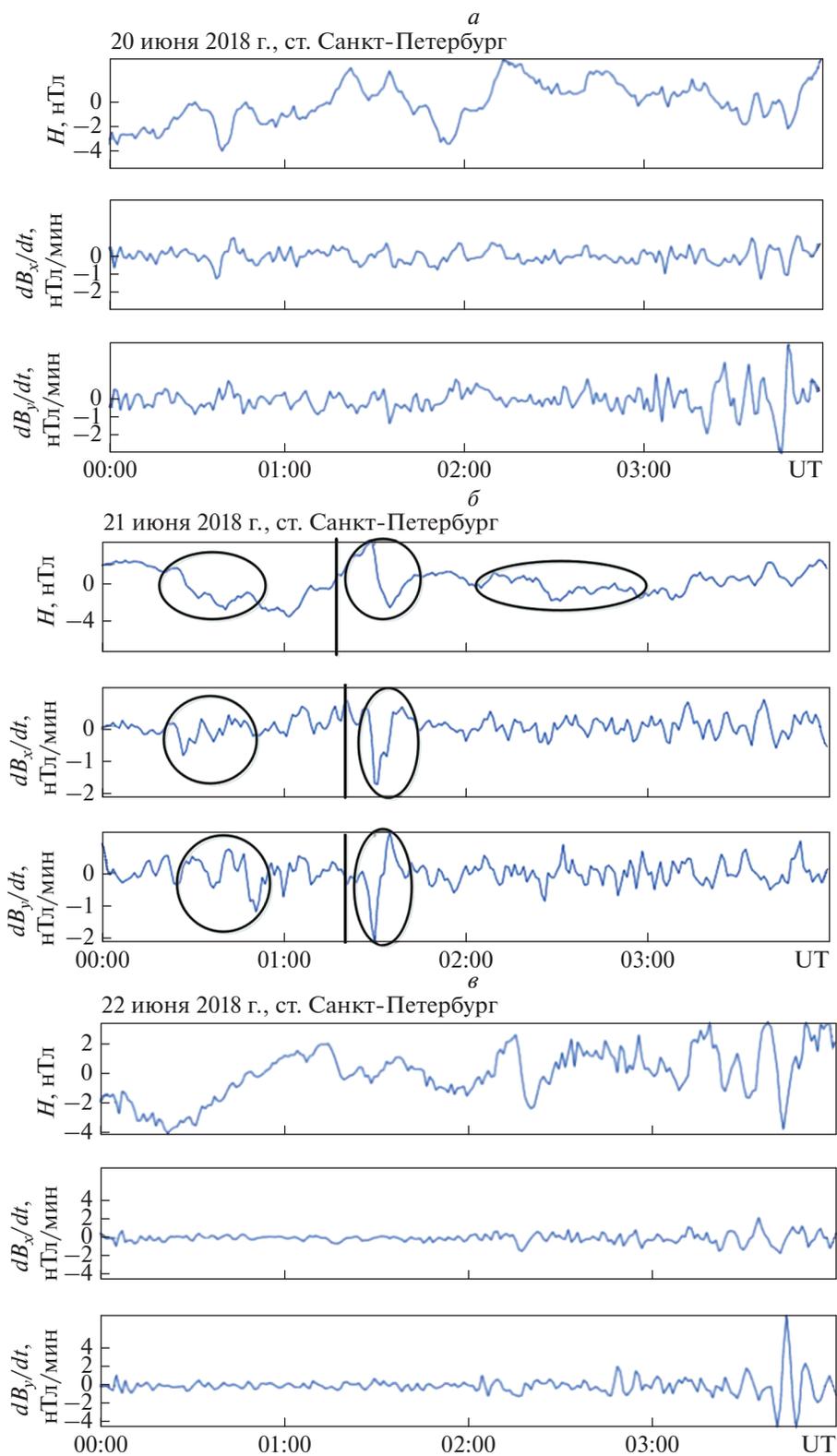


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для ст. Санкт-Петербург. Расстояние $R = 1$ Мм.

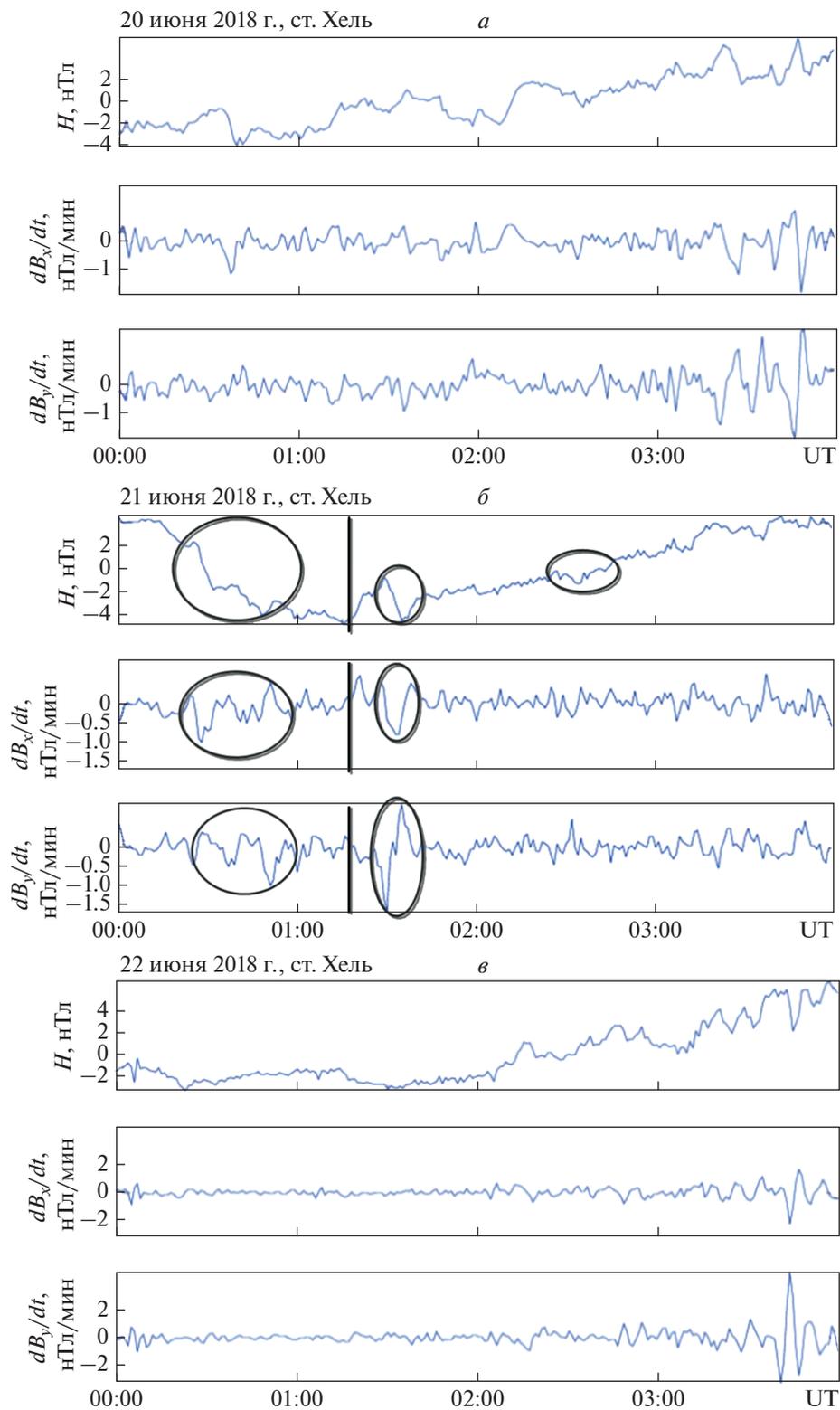


Рис. 4. То же, что и на рис. 1, для ст. Хель. Расстояние $R = 1.28$ Мм.

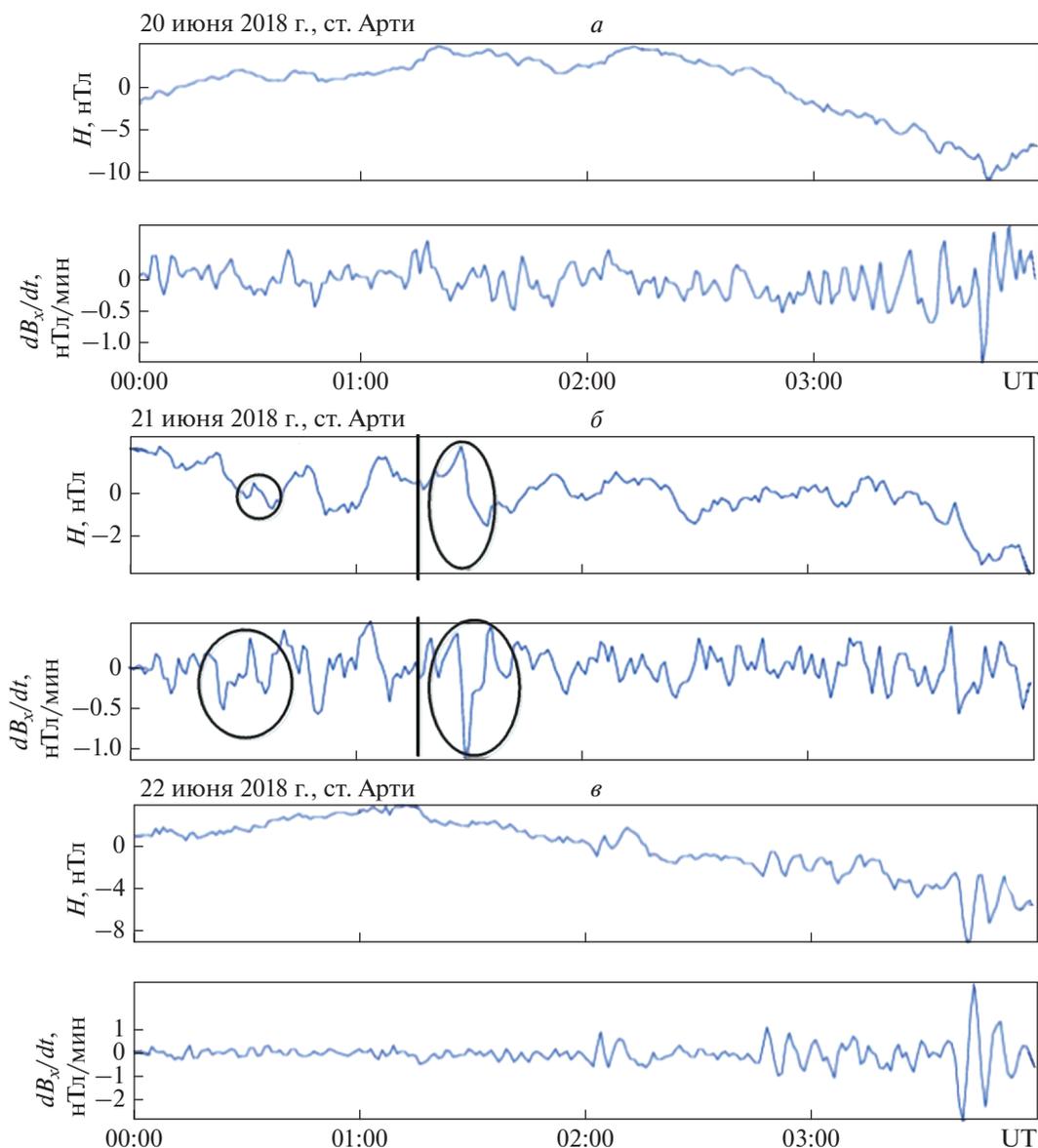


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, для ст. Арти. Расстояние $R = 1.37$ Мм.

ния производных флуктуировали в пределах ± 0.5 и ± 0.4 нТл/мин соответственно (рис. 6а, 6в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 00:21–00:50 отмечались знакопеременные вариации уровня H -компоненты с амплитудой до 1 нТл. Значения производных флуктуировали в пределах 1–1.5 нТл/мин (рис. 6б).

Обсерватория Алма-Ата. 20 и 22 июня 2018 г. наблюдались медленные вариации уровня H -компоненты, амплитуда более быстрых (характерное время ~ 2 –3 мин) флуктуаций не превышала 0.5 нТл. Производные dBx/dt флуктуировали в пределах 0.3–0.4 и 0.1–0.2 нТл/мин, а производные dB_y/dt – в пределах 0.5–0.7 и 0.3–0.5 нТл/мин (рис. 7а, 7в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 00:21–00:32 наблюдались знакопеременные вариации уровня H -компоненты с амплитудой ~ 0.5 нТл. Значения производных в этом же интервале времени флуктуировали в пределах 0.3–0.4 и 0.4–0.5 нТл/мин (рис. 7б).

Обсерватория Иркутск. 20 и 22 июня 2018 г. отмечались медленные вариации уровня H -компоненты, более быстрые (с характерным временем ~ 2 –3 мин) ее флуктуации имели амплитуду не более 0.5 нТл. Производные флуктуировали в пределах 0.5–0.6 и 0.3–0.4 нТл/мин (рис. 8а, 8в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 00:21–00:59 отмечались упорядоченные знакопеременные вариации уровня H -компоненты с амплиту-

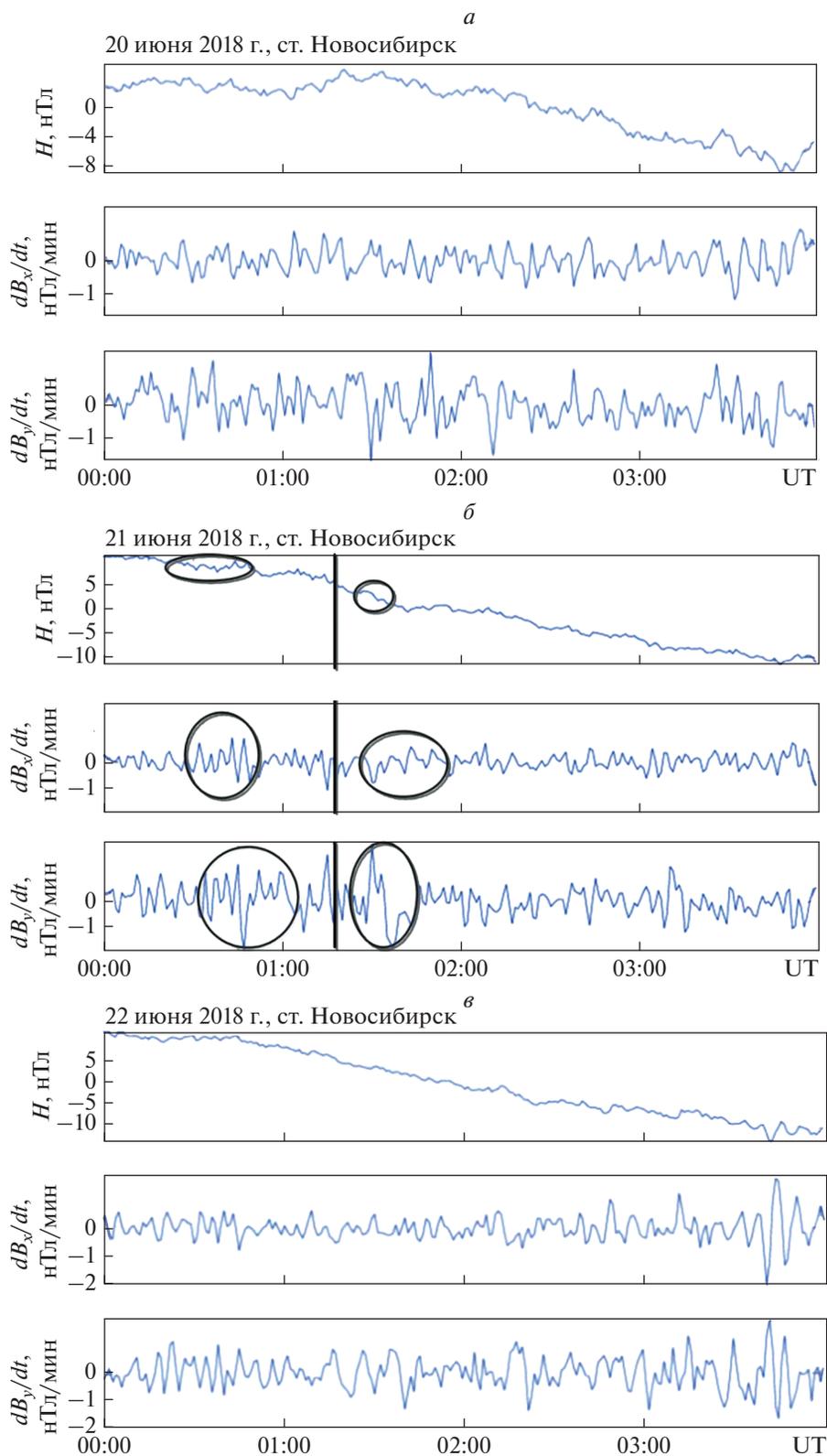


Рис. 6. То же, что и на рис. 1, для ст. Новосибирск. Расстояние $R = 2.919$ Мм.

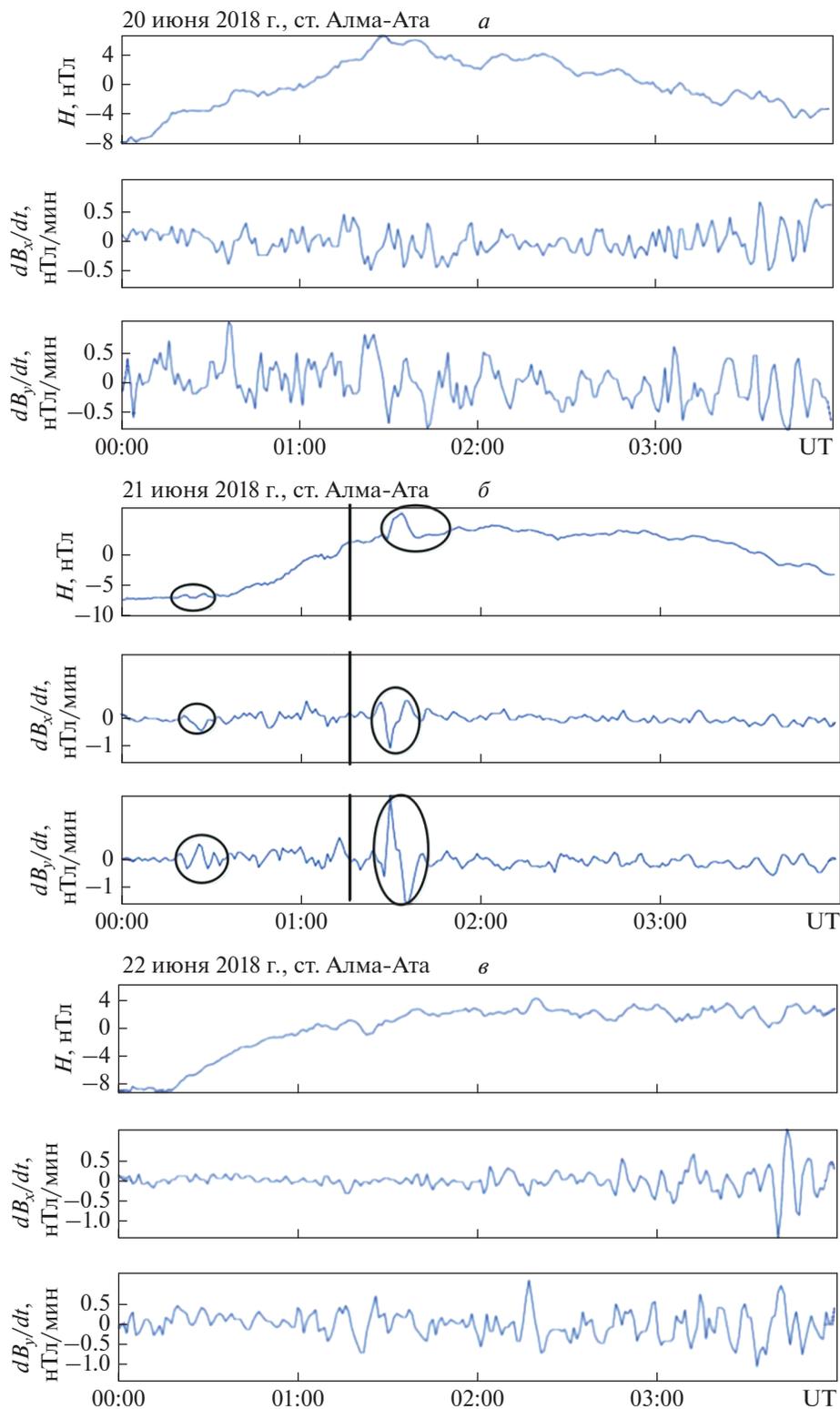


Рис. 7. То же, что и на рис. 1, для ст. Алма-Ата. Расстояние $R = 3.034$ Мм.

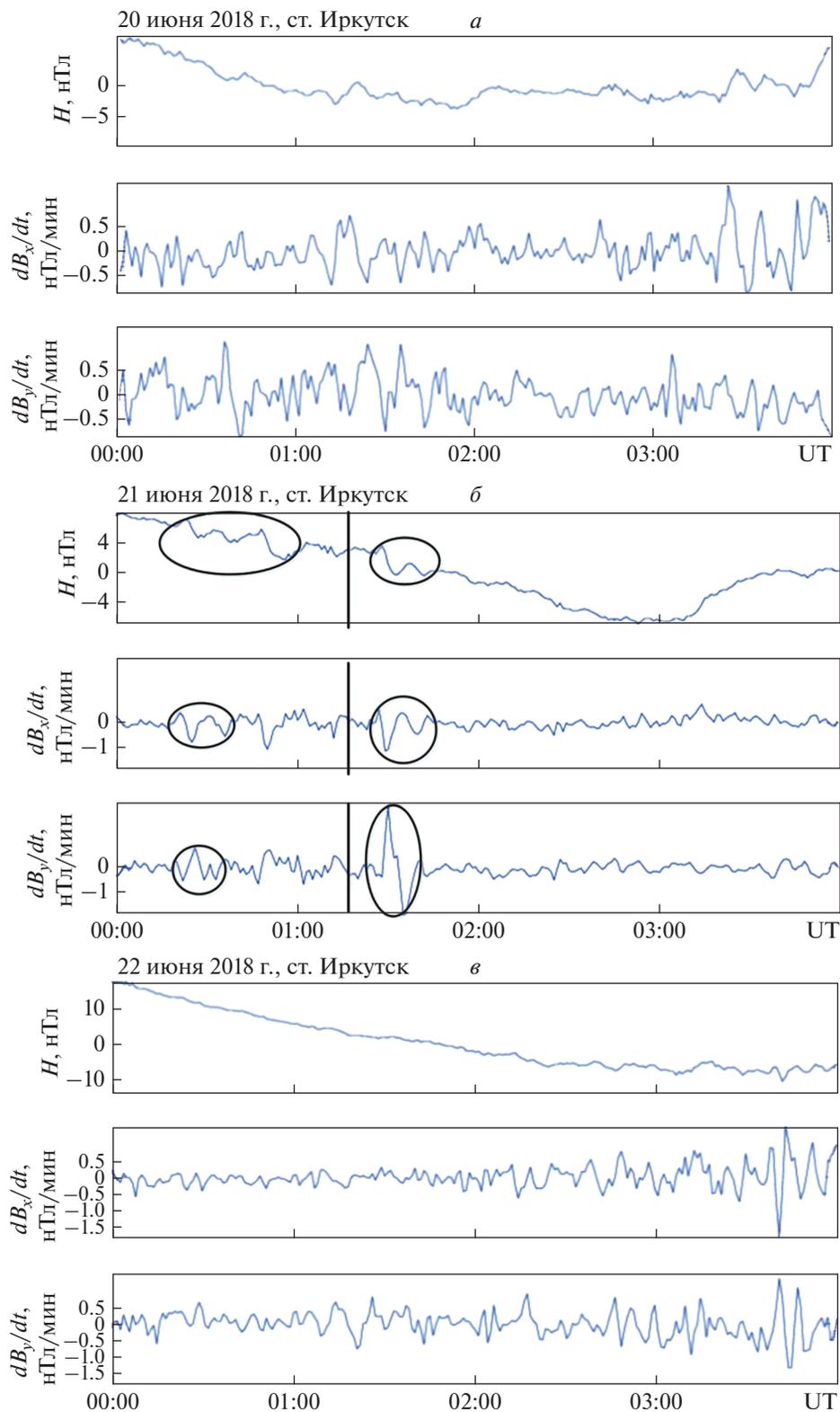


Рис. 8. То же, что и на рис. 1, для ст. Иркутск. Расстояние $R = 4.324$ Мм.

Таблица 2. Параметры магнитного эффекта при подлете Липецкого метеороида

Обсерватории	Амплитуда возмущения ΔH , нТл	Время упреждения, мин	Продолжительность возмущения, мин
Киев	0.5	54–56	15–32
Борок	0.5	54–56	18–30
Санкт-Петербург	0.5	54–56	24
Хель	0.5	54–56	29
Арти	0.5–1	54–56	54
Новосибирск	0.5–1	54–56	29
Алма-Ата	0.5	56	11
Иркутск	1–1.5	55–57	38

дой 1.1–1.3 нТл. При этом производные флуктуировали в пределах ± 0.6 нТл/мин (рис. 8б).

Основные параметры магнитного эффекта, наблюдавшегося при подлете Липецкого метеороида и имевшие время упреждения (до взрыва тела) ~ 54 –56 мин, приведены в табл. 2. Из таблицы 2 видно, что амплитуда возмущения H -компоненты во всех обсерваториях была близка к 0.5 нТл, а продолжительность возмущения – ~ 20 –30 мин.

5.2. Магнитный эффект взрыва метеороида

Рассмотрим теперь интервал времени 01:00–02:00. Взрыв метеороида наблюдался в 01:16:20.

Обсерватория Киев. 20 и 22 июня 2018 г. регистрировались сравнительно медленные вариации уровня H -компоненты. Их амплитуда не превышала 0.4 и 0.5 нТл соответственно. Значения производных флуктуировали в пределах 0.3 и 0.2 нТл/мин (рис. 1а, 1в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 01:23–01:38 наблюдалось сначала увеличение на ~ 1 нТл, а затем уменьшение на ~ 1 нТл уровня H -компоненты. Примерно такие же вариации отмечались и в Z -компоненте. Значения производных флуктуировали в пределах ± 0.5 и ± 0.7 нТл/мин. Значения производной dBz/dt изменялись в пределах ± 0.4 нТл/мин (рис. 1б).

Обсерватория Борок. 20 и 22 июня 2018 г. вариации уровня H -компоненты были значительными, их амплитуда достигала 1.2 и 1 нТл соответственно. Производные флуктуировали в пределах ± 0.8 и ± 0.4 нТл/мин соответственно (рис. 2а, 2в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 01:23–01:43 наблюдалось сначала увеличение на ~ 5 нТл, а затем уменьшение на ~ 3 нТл уровня H -компоненты. Значения производных изменялись от 0.5 до -2 нТл/мин и от 0.5 до -1 нТл/мин соответственно (рис. 2б).

Обсерватория Санкт-Петербург. 20 и 22 июня 2018 г. наблюдались значительные вариации уровня H -компоненты, их амплитуда достигала

1.5 и 1.1 нТл соответственно. Значения производных флуктуировали в пределах ± 0.6 и ± 0.4 нТл/мин соответственно (рис. 3а, 3в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 01:23–01:43 отмечалось сначала увеличение на ~ 4 нТл, а затем уменьшение примерно на 3 нТл уровня H -компоненты. Значения производных при этом изменялись от 0.5–1.0 до $-(1.7$ –2.0) нТл/мин (рис. 3б).

Обсерватория Хель. 20 и 22 июня 2018 г. уровень H -компоненты флуктуировал в пределах ± 1 и ± 0.3 нТл соответственно. Значения производных изменялись в пределах ± 0.5 и ± 0.3 нТл/мин (рис. 4а, 4в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 01:24–01:40 регистрировалось сначала увеличение уровня H -компоненты на ~ 2 нТл, а затем ее уменьшение на такую же величину. Значения производных поменялись от 0.5 до -0.8 нТл/мин и от 1.1 до -1.3 нТл/мин соответственно (рис. 4б).

Обсерватория Арти. 20 и 22 июня 2018 г. уровень H -компоненты флуктуировал в пределах ± 1 и ± 0.4 нТл соответственно. Значения производной dBx/dt изменялись от 0.5 до -0.4 нТл/мин и от 0.2 до -0.2 нТл/мин (рис. 5а, 5в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 01:24–01:37 уровень H -компоненты сначала увеличился примерно на 2 нТл, а затем уменьшился на ~ 1.8 нТл. Значения производной dBx/dt изменялись в пределах от 0.4 до -1.1 нТл/мин (рис. 5б).

Обсерватория Новосибирск. 20 и 22 июня 2018 г. вариации уровня H -компоненты не превышали ± 1 нТл. Значения производных изменялись в пределах от ± 0.5 до ± 1.0 нТл/мин (рис. 6а, 6в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 01:27–01:35 уровень H -компоненты сначала увеличился на ~ 1 нТл, а затем уменьшился на столько же. При этом для Z -компоненты амплитуда подобных вариаций составляла ~ 2 нТл. Флуктуации уровня производных изменялись в пределах ± 0.5 и ± 2 нТл/мин соответственно (рис. 6б).

Обсерватория Алма-Ата. 20 и 22 июня 2018 г. амплитуда вариаций H -компоненты была ~ 1 нТл. Значения производной dBx/dt изменялись в пределах ± 0.4 и ± 0.2 нТл/мин соответственно, в то же время значения производной dBu/dt варьировались в пределах ± 0.8 и ± 0.5 нТл/мин соответственно (рис. 7а, 7в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 01:27–01:52 амплитуда H -компоненты сначала резко увеличилась на ~ 3 нТл, а затем медленно (в течение 15 мин) уменьшалась. Максимальное уменьшение составило 1–1.5 нТл. Значения производной dBx/dt изменялись от 0.5 до -1.2 нТл/мин, а значения производной dBu/dt – от 2.5 до -2 нТл/мин (рис. 7б).

Обсерватория Иркутск. 20 и 22 июня 2018 г. уровень вариаций H -компоненты варьировался в пределах ± 2 и ± 1 нТл. Амплитуда флуктуаций уровня производной dBx/dt не превышала ± 0.6 и ± 0.3 нТл/мин (рис. 8а, 8в).

21 июня 2018 г. в интервале времени 01:29–01:45 наблюдались знакопеременные вариации уровня H -компоненты, амплитуда которых достигала примерно 1.1 нТл. Значения производной dBx/dt изменялись от 0.3 до -1.2 нТл/мин, а значения производной dBu/dt – от 2.6 до -2.2 нТл/мин (рис. 8б).

Основные параметры магнитного эффекта, последовавшего за взрывом Липецкого метеороида, приведены в табл. 1. Из таблицы 1 видно, что время запаздывания Δt геомагнитного возмущения увеличивалось при увеличении расстояния r между местом взрыва метеороида и обсерваторией. Амплитуда возмущения имела тенденцию к уменьшению при увеличении r . Продолжительность эффекта практически не зависела от расстояния и составляла около 20–30 мин.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Рассмотрим отдельно магнитные эффекты, наблюдавшиеся при подлете космического тела и после его взрыва.

6.1. Магнитный эффект магнитосферы

Первый магнитный эффект начал наблюдаться за 54–56 мин до взрыва метеороида и продолжался ~ 15 –20 мин. Механизм этого эффекта предложен в работе автора [Черногор, 2018б]. Он заключается в следующем.

Вторжение метеороида, имеющего огромный запас кинетической энергии (~ 2.8 кт ТНТ), оказало взрывоподобное влияние на магнитосферу Земли. При движении космического тела с кинетической энергией E вдоль его траектории происходит вытеснение геомагнитного поля. Область

возмущения геомагнитного поля по форме близка к форме цилиндра длиной L_m и радиусом R_m . Здесь L_m – характерный масштаб неоднородности геомагнитного поля вдоль направления движения астероида. Значения L_m можно оценить из формулы $L_m \approx R_E L/3$, где $R_E \approx 6.4$ Мм – радиус Земли. Если предположить, что в расширении области возмущения геомагнитного поля принимала участие вся энергия тела, то радиус этой области дается следующим соотношением:

$$R_m = \sqrt{\frac{\gamma_m - 1}{\gamma_m} \frac{E}{\pi p_m L_m}}, \quad (1)$$

где $\gamma_m = 2$ – показатель адиабаты при радиальном расширении магнитного поля; p_m – магнитное давление. Для p_m справедливо следующее соотношение:

$$p_m = \frac{B^2}{2\mu_0},$$

где B – невозмущенное значение индукции геомагнитного поля на заданном расстоянии от поверхности Земли или при заданном значении параметра Мак-Илвейна L ; μ_0 – магнитная постоянная.

Вследствие упругости магнитных силовых линий возникают их колебания с периодом

$$T = \frac{2R_m}{v_A}, \quad v_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 N m_i}} = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \rho_i}},$$

где v_A – альвеновская скорость; N – концентрация ионов; m_i – их масса; $\rho_i = N m_i$.

Характерное время радиального расширения магнитного поля для цилиндрической модели дается следующим соотношением:

$$t_{\text{exp}} = R_m^2 \left(\frac{\rho_i L_m}{E} \right)^{1/2}.$$

Модельные значения концентрации и плотности ионов, индукция геомагнитного поля для широты 50° , позаимствованные из монографии [Молчанов, 1985], приведены в табл. 3. В этой же таблице представлены расчетные значения v_A , p_m , R_m , t_{exp} и T при различных L_m . При оценке массы иона учитывался ионный состав. При $L \geq 4$ масса иона $m_i \approx 1.7 \times 10^{-27}$ кг. Как показали расчеты, скорость v_A изменялась от 8.1 до 1.6 тыс. км/с, давление p_m – в пределах 300–0.2 мкПа, а размер R_m – в пределах 0.057–1.2 Мм при $L \approx 3$ –10 соответственно. Из таблицы 3 видно, что на расстояниях, соответствующих оболочке $L = 9$ –10, т.е. при $z = 51.2$ –57.6 Мм, значения T близки к 1–1.5 с.

Радиальное расширение магнитных силовых линий означает вытеснение магнитного поля из полости длиной L_m и диаметром $2R_m$. Это эквивалентно появлению магнитного диполя соответ-

Таблица 3. Зависимости модельных параметров магнитосферы и рассчитанных параметров области возмущения геомагнитного поля от параметра Мак-Илвейна

L	3	4	5	6	7	8	9	10
L_m , Мм	6.4	8.5	10.7	12.8	14.9	17.1	19.2	21.3
B , мкТл	27.6	12.5	5.6	3.5	2.2	1.4	1.0	0.7
z , км	1.28×10^4	1.92×10^4	2.56×10^4	3.2×10^4	3.84×10^4	4.48×10^4	5.12×10^4	5.76×10^4
N , м ⁻³	4.4×10^9	1.35×10^9	8.4×10^8	4.5×10^8	3×10^8	2×10^8	1.5×10^8	10^8
ρ_i , кг/м ³	9.2×10^{-18}	2.3×10^{-18}	1.4×10^{-18}	7.7×10^{-19}	5.1×10^{-19}	3.4×10^{-19}	2.6×10^{-19}	1.7×10^{-19}
v_A , км/с	8.1×10^3	7.4×10^3	4.2×10^3	3.6×10^3	2.8×10^3	2.2×10^3	1.8×10^3	1.6×10^3
p_m , мкПа	300	63	13	4.9	1.9	0.8	0.4	0.2
R_m , км	57	108	212	316	470	676	902	1211
ΔB , нТл	0.55	0.40	0.38	0.34	0.33	0.32	0.31	0.31
t_{exp} , с	7.2×10^{-3}	1.5×10^{-2}	5.1×10^{-2}	9.2×10^{-2}	0.18	0.32	0.53	0.81
T , с	1.4×10^{-2}	2.9×10^{-2}	0.10	0.18	0.33	0.61	1.0	1.51

ствующего размера с индукцией магнитного поля B . Диполь генерирует компоненты магнитного поля пропорциональные r^{-1} , r^{-2} и r^{-3} . При данных параметрах диполя главным членом является член, для которого

$$\Delta B = B \left(\frac{R_m}{r} \right)^2.$$

Поскольку время упреждения $\Delta t \approx 54$ – 56 мин, при среднем значении 55 мин получим, что $r = v\Delta t \approx 47.5$ Мм, чему соответствует $L \approx 8.4$. При этом $B \approx 1.2$ мкТл, а $\Delta B \approx 0.34$ нТл. Считалось, что $R_m \approx 800$ км (табл. 3). Полученное значение ΔB близко к наблюдаемому (0.5 нТл). Различие, по-видимому, связано с тем, что при $L \approx 8$ – 9 магнитное поле уже заметно отличается от дипольного.

Длительность магнитного импульса оценивается из следующего соотношения:

$$\Delta T = \frac{L_m}{v}.$$

При $L \approx 8.4$ имеем $L_m \approx 18$ Мм. Тогда $\Delta T \approx 1.25 \times 10^3$ с ≈ 21 мин. Это значение очень близко к наблюдаемому значению ($\Delta \bar{T} \approx 25.4 \pm 3.1$ мин) (табл. 2). Значение $\Delta \bar{T}$ оценивалось без аномально большой величины $\Delta T \approx 54$ мин.

Из соотношения (1) для дипольной модели геомагнитного поля следует зависимость масштаба R_m от расстояния r :

$$R_m \sim \frac{1}{\sqrt{p_m L_m}} \sim \frac{1}{B \sqrt{L_m}} \sim \frac{r^3}{r^{1/2}} \sim r^{5/2}.$$

Тогда для возмущений магнитного поля у поверхности Земли имеем

$$\Delta B(r) = B \left(\frac{R_m}{r} \right)^2 \sim \frac{1}{r^3} r^3.$$

В таком приближении ΔB от r практически не зависит.

При увеличении L , однако, дипольное приближение для невозмущенного геомагнитного поля все меньше соответствует действительности, а при $L \approx 9$ – 10 и вовсе становится не справедливым. При $L > 6$ с подсолнечной стороны $B \sim \frac{1}{r^\alpha}$, где за счет сжатия силовых линий $\alpha < 3$.

Тогда $R_m \sim r^{\alpha-1/2}$, а $\Delta B(r) \sim \frac{1}{r^\alpha} \left(\frac{r^{\alpha-1/2}}{r} \right)^2 \sim r^{\alpha-3}$. Видно, что при $\alpha < 3$ значения $\Delta B(r)$ уменьшаются при увеличении r . Это означает, что при $L > 6$ зависимость возмущения магнитного поля ΔB от расстояния становится убывающей. Следовательно, имелся оптимальный диапазон дальностей, где возмущение ΔB было максимальным. Этому диапазону соответствовали значения $L \approx 8$ – 9 .

6.2. Магнитный эффект ионосферы

После взрыва метеороида в возмущении геомагнитного поля наблюдался двухполярный (двухфазный) импульс. Сначала величина ΔH увеличилась, а затем уменьшилась по сравнению с невозмущенным значением. Такие двухполярные процессы свойственны взрывным процессам: сначала наблюдается фаза сжатия, а затем – фаза разрежения. Из этого следует, что магнитный эффект, наблюдаемый после взрыва метеороида, связан с ударной волной от взрыва.

Полет и взрыв метеороида сопровождался генерацией ударной волны в воздухе. Волна начала эффективно генерироваться на высотах $z_m \approx 65$ – 70 км, на высоте взрыва $z_e \approx 27$ км процесс генерации закончился. Тогда длительность ударной волны

$$\tau \approx \frac{z_m - z_e}{v_s}, \quad (2)$$

Таблица 4. Высотная зависимость избыточного давления в ударной волне и ее длительность

z , км	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$\Delta p/p$	0.11	0.07	0.09	0.13	0.21	0.36	0.61	1.06	1.33	1.62
Δp , Па	2×10^2	34	11	4.4	1.86	0.84	0.37	0.17	0.13	0.11
p_0 , Па	1.8×10^3	4.8×10^2	1.3×10^2	33.5	8.8	2.3	0.6	0.16	0.10	0.07
ΔT , мин	6.3–7.2	9.1–10.3	10.5–11.9	11.5–13.0	12.3–13.9	13.0–14.4	13.5–15.3	14.0–15.8	14.5–16.4	14.9–16.8

где $v_s \approx 0.3$ км/с – скорость звука. Из (2) имеем, что $\tau \approx 127–143$ с. После прохождения фазы сжатия длительностью τ имеет место фаза разрежения примерно такой же длительности. Тогда общая длительность возмущения в воздухе составляет $T_0 \approx 2\tau$. За счет дисперсии длительность возмущения увеличивается. Согласно [Infrasound ..., 2010]

$$\Delta T \approx \Delta T_0 \left(\frac{\Delta z}{R_e} \right)^{1/4}, \quad (3)$$

где R_e – поперечный размер (радиус) ударной волны; $\Delta z = z - z_e$. Для него справедливо следующее соотношение:

$$R_e = \sqrt{\frac{E_L}{\pi p(z_e)}} = \sqrt{\frac{E}{\pi p(z_e) L_e}}, \quad (4)$$

где $E_L = E/L_e$ – погонная плотность энергии метеороида; $L_e \approx H/2$ – эффективная протяженность области взрыва; $H \approx 7.5$ км – приведенная высота атмосферы; $p(z_e) \approx 2.7 \times 10^3$ Па – давление атмосферы на высоте взрыва. Из (4) следует, что $R_e \approx 0.6$ км.

Результаты расчета ΔT по соотношению (3) приведены в табл. 4. Из таблицы 4 видно, что на высотах динамо-области ионосферы, которая ответственна за генерацию наблюдаемого магнитного эффекта, $\Delta T \approx 14–17$ мин. Это значение очень близко к значению $\Delta T \approx 20–30$ мин, полученному из наблюдения геомагнитного эффекта (см. табл. 1).

Рассмотрим далее высотную зависимость избыточного давления Δp в ударной волне. Из соотношения для относительного избыточного давления $\Delta p/p$, приведенного в работе [Infrasound ..., 2010], при $\Delta z \gg R_e$ получим

$$\frac{\Delta p}{p} \approx 0.3 \left(\frac{R_e}{\Delta z} \right)^{3/4} e^{\Delta z/2H}.$$

Результаты расчета $\Delta p/p$ и Δp приведены в табл. 4. Из таблицы видно, что значения $\Delta p/p$ при удалении от источника сначала убывают, а затем вследствие падения с высотой давления в атмосфере p увеличиваются и достигают на высотах динамо-области ионосферы значений 0.6–1.6. Реально эти значения существенно меньше, так как не учитывались нелинейные эффекты, приводящие

к затуханию ударной волны при $\Delta p/p > 0.1–0.2$. С учетом нелинейного затухания максимальное значение $\Delta p/p$ не превышает 0.2–0.3 при $z \approx 80–150$ км.

Ударная волна на высотах ионосферы приводила к возмущению концентрации электронов N . При этом грубо можно полагать, что $\Delta N/N \approx \Delta p/p$. Тогда на высотах динамо-области $\Delta N/N \approx 0.2–0.3$. Возмущение концентрации электронов сопровождается возмущением плотности ионосферного тока в динамо-области ионосферы

$$\Delta j = j_0 \frac{\Delta N}{N}, \quad (5)$$

где j_0 – невозмущенное значение плотности ионосферного тока. Появление импульса тока приводит к возмущению индукции магнитного поля. Согласно уравнению Максвелла

$$\text{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \Delta \mathbf{j}, \quad (6)$$

где μ_0 – магнитная постоянная. Из (6) с учетом (5) следует оценка магнитного эффекта

$$\Delta B \approx \mu_0 j_0 \Delta z_j \frac{\Delta N}{N}, \quad (7)$$

где Δz_j – толщина динамо-области. Полагая в (7) $j_0 \approx 3 \times 10^{-7}$ А/м² (утреннее время), $\Delta z_j \approx 40$ км, $\Delta N/N \approx 0.2–0.3$, получим, что $\Delta B \approx 3–4.5$ нТл. При среднем значении $\Delta N/N \approx 0.25$ имеем $\Delta B \approx 3.75$ нТл. Полученное значение $\Delta B \approx 3.75$ нТл совпало с наблюдаемым в ближайшей к месту взрыва обсерватории Борок значению $\Delta H \approx 3.75$ нТл. Значения ΔH в обсерватории Киев, находящейся на таком же расстоянии, заметно отличаются от 3.75 нТл. Это, возможно, обусловлено анизотропией магнитного эффекта в результате анизотропного действия ударной волны на атмосферу.

7. ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение магнитных вариаций в день падения Липецкого метеороида и в контрольные дни показывает, что в интервале времени 00:20–01:00 и 01:20–01:40 в день падения эти вариации отличались от вариаций в контрольные дни. Заметим, что магнитное поле 20 июня 2018 г. было еще возмущенным предшествующей бурей. Поэтому в качестве контрольных суток следует рассматри-

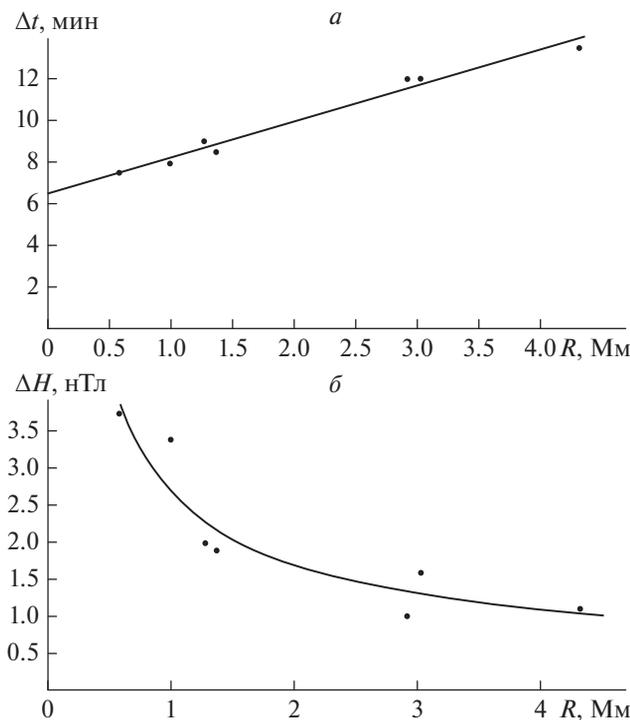


Рис. 9. Зависимость времени запаздывания (а) и амплитуды (б) вариаций возмущений H -компоненты геомагнитного поля от расстояния. Сплошными линиями показаны регрессии, описываемые следующими уравнениями: $\Delta t = 1.717r + 6.509$, коэффициент достоверности аппроксимации $R_d^2 = 0.9806$, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0.357$ (Δt измеряется в мин, а r – в Мм), $\Delta H = \frac{1.721}{\sqrt{r}} + \frac{0.973}{r}$, $R_d^2 \approx 0.8722$, $\sigma = 0.4206$ (ΔH измеряется в нТл, а R – в Мм).

вать сутки 22 июня 2018 г. Вариации магнитного поля в указанных интервалах времени 21 июня 2018 г. имели двухполярный характер, свойственный взрывным процессам. Кроме того, величина возмущений и производных 21 июня 2018 г. была существенно больше, чем 22 июня 2018 г. Эти аргументы свидетельствуют в пользу того, что описанные магнитные эффекты были связаны с Липецким метеороидом. Далее рассмотрим другие аргументы, свидетельствующие в пользу Липецкого метеороида.

7.1. Магнитный эффект магнитосферы

Впервые магнитный эффект магнитосферы крупного метеороида обнаружен и объяснен в работе [Черногор, 2018б]. Скорость и кинетическая энергия Челябинского метеороида составляли 18.5 км/с и 440 кт ТНТ. Скорость и кинетическая энергия Липецкого метеороида были существенно меньше – 14.4 км/с и 2.8 кт ТНТ. По этой при-

чине эффект магнитного диполя (эффект вытеснения магнитного поля) мог возникнуть при меньших значениях геомагнитного поля, т.е. при больших значениях $L \approx 8-9$. Для Челябинского метеороида он наблюдался при $L \approx 5-7$. Большим значениям L и меньшим скоростям соответствует большее время упреждения

$$\Delta t = \frac{R_E(L-1)}{v}. \quad (8)$$

При $L = 8-9$ и $v = 14.4$ км/с из (8) имеем $\Delta t \approx 52-59$ мин, что близко к наблюдаемым значениям 54–56 мин (табл. 2).

Как уже отмечалось, вытеснение магнитного поля эквивалентно появлению магнитного диполя. Последний является источником электромагнитного импульса. По расчетам магнитная компонента этого импульса у поверхности Земли составила ~ 0.3 нТл, что согласуется с результатами наблюдений – 0.5 нТл (табл. 2).

Оцененная длительность магнитного импульса равнялась 21 мин, что также согласуется с результатами наблюдений – (25.4 ± 3.1) мин (табл. 2).

Таким образом, соответствие результатов моделирования магнитосферного эффекта Липецкого метеороида результатам наблюдения свидетельствует об адекватности предложенной модели магнитосферного эффекта крупных метеороидов. Можно считать установленным, что магнитный эффект магнитосферы уверенно наблюдается при энергии метеороида $\sim 10^{13}$ Дж (2.8 кт ТНТ).

7.2. Магнитный эффект ионосферы

Механизм магнитного эффекта, наблюдаемого после взрыва метеороида, является следующим. Ударная волна от взрыва, распространяясь вверх, вызывает двухполярные вариации давления (фаза сжатия и фаза разрежения) на высотах ионосферы. На высотах динамо-области ($z \approx 90-150$ км) возникают двухполярные вариации концентрации электронов, а значит и плотности ионосферного тока. Вариации последней приводят к генерации двухполярных вариаций магнитного поля, что и наблюдалось во всех обсерваториях.

Для доказательства ключевой роли ударной волны построена зависимость времени запаздывания магнитного эффекта от расстояния между местом взрыва метеороида и обсерваторией (рис. 9а). Из рис. 9а видно, что значения Δt увеличиваются при увеличении R . Эта зависимость описывается уравнением регрессии

$$\Delta t = 1.717R + 6.509, \quad R_d^2 = 0.9806, \quad \sigma = 0.357, \quad (9)$$

где Δt измеряется в минутах, а R – в мегаметрах, R_d^2 – коэффициент достоверности, σ – среднеквадратическое отклонение. Из (9) следует, что

при $R = 0$ имеем $\Delta t_0 \approx 6.5$ мин. Интервал времени Δt_0 складывается из времени Δt_1 распространения ударной волны до динамо-области ионосферы и времени Δt_2 становления возмущений N . Действительно, при средних значениях $\Delta z = z_d - z_e \approx 93$ км ($z_d \approx 120$ км – высота середины динамо-области) и $v_s \approx 0.3$ км/с имеем $\Delta t \approx 5.2$ мин. Время $\Delta t_2 = (2\alpha N)^{-1}$, где $\alpha \approx 2 \times 10^{-13} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ – коэффициент рекомбинации электронов с молекулярными ионами. В утреннее время $N \approx 3 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а $t_N \approx 1.4$ мин. При этом $\Delta t_0 = \Delta t_1 + \Delta t_2 \approx 6.6$ мин. Это значение достаточно близко к $\Delta t_0 \approx 6.5$ мин, полученному из данных наблюдений.

Из соотношения (9) следует, что средняя скорость распространения магнитного возмущения

$$v_m = \left(\frac{d\Delta t}{dr} \right)^{-1} \approx 9.7 \text{ км/с.}$$

Поглощение ударной волны на высотах ионосферы приводит к генерации атмосферных гравитационных волн и медленного магнитного звука. Эти волны, распространяясь почти в горизонтальном направлении на расстояния $\sim 100\text{--}1000$ км, приводят к наблюдаемому магнитному эффекту. Из уравнения регрессии (9) следует, что скорость распространения магнитных возмущений составляла ~ 9.7 км/с. Такова была скорость магнитного звука, сгенерированного ударной волной метеороида. Заметим, что такую же скорость имеют медленные магнитогидродинамические волны, детально изученные в монографии [Сорокин и Федорович, 1982]. Перенос возмущений со скоростями $\sim 3\text{--}10$ км/с нами неоднократно наблюдался после стартов ракет [Черногор, 2009; Chernogor and Blaunstein, 2013]. Зависимость времени запаздывания магнитного эффекта от расстояния однозначно свидетельствует о том, что эффект вызван метеороидом.

Другим доказательством причины происхождения магнитного эффекта служит зависимость амплитуды этого эффекта от расстояния (рис. 9б). Из рис. 9б видно, что наблюдается тенденция к уменьшению амплитуды магнитного эффекта при удалении от места взрыва космического тела. Уравнение соответствующей регрессии имеет вид:

$$\Delta H = \frac{1.721}{\sqrt{R}} + \frac{0.973}{R}, \quad R_d^2 \approx 0.8722, \quad \sigma = 0.4206. \quad (10)$$

Здесь ΔH измеряется в нТл, а R – в мегаметрах. При построении регрессии не учитывалось аномально малое значение амплитуды возмущения магнитного поля в обсерватории Киев.

Зависимость $\Delta H(R)$ в виде (10) свидетельствует о том, что возмущения магнитного поля вызваны возмущением давления Δp в атмосфере под действием ударной волны от взрыва. Зависимости $\Delta p \sim R^{-1}$ и $\Delta p \sim R^{-1/2}$ свойственны сферической и

цилиндрической (за счет волноводного распространения) расходящимся ударной волны. Вклад этих расходящихся при $R \sim 0.6\text{--}4$ Мм сопоставим.

Соответствие основных параметров модели (времени запаздывания, продолжительности и амплитуды) магнитного эффекта параметрам, определенным из данных наблюдений, свидетельствует об адекватности предложенной модели.

8. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием данных наблюдений на восьми магнитных обсерваториях проанализированы вариации геомагнитного поля, предшествующие взрыву Липецкого метеороида, а также после взрыва, и установлено следующее.

1. Обнаружено, что за 54–56 мин до взрыва метеороида имело место двухполярное (фаза сжатия и разрежения) возмущение магнитного поля с амплитудой ~ 0.5 нТл, со средней продолжительностью ~ 25 мин. Предложена модель этого магнитного эффекта. В основе модели лежит вытеснение геомагнитного поля из области пролетающего в магнитосфере ($L \approx 8\text{--}9$) метеороида и генерация магнитного эффекта эквивалентным магнитным диполем. Результаты модельных оценок основных параметров магнитного возмущения хорошо соответствуют результатам наблюдений.

2. Обнаружено, что с временем запаздывания, изменяющимся от 7–8 до 13–14 мин при увеличении расстояния между местом взрыва и обсерваторией от 0.584 до 4.324 Мм, возникало двухполярное возмущение геомагнитного поля, свойственное взрывным процессам, длительностью 15–20 мин и амплитудой от ~ 4 до ~ 1 нТл для $r \approx 0.584\text{--}4.324$ Мм соответственно. Предложена модель магнитного эффекта. В основе этой модели лежит возмущение концентрации электронов и плотности ионосферного тока на высотах динамо-области ударной волной, возникшей в результате пролета и взрыва метеороида. Соответствие результатов моделирования результатам наблюдений свидетельствует об адекватности модели и метеороидной природе магнитного эффекта.

3. Установлено, что метеороиды с кинетической энергией $\sim 10^{13}$ Дж способны вызывать магнитный эффект в магнитосфере и ионосфере, регистрируемый наземными магнитометрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астапович И.С. Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Физматгиз. 634 с. 1958.
- Бронштэн В.А. Тунгусский метеорит: история исследования. М.: А.Д. Сельянов (изд.). 322 с. 2000.
- Бронштэн В.А. Магнитный эффект Тунгусского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 6. С. 854–856. 2002.

- Гольдин В.Д. Об интерпретации некоторых геофизических явлений, сопровождавших падение Тунгусского метеорита // Космическое вещество и Земля. Новосибирск: Наука. Сиб. отд. С. 44–62. 1986.
- Золотов А.В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г. Минск: Наука и техника. 202 с. 1969.
- Иванов К.Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита // Метеоритика. Вып. 21. С. 46–48. 1961а.
- Иванов К.Г. О причине последующих изменений поля в геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 1. № 4. С. 616–618. 1961б.
- Иванов К.Г. Геомагнитные эффекты взрывов в нижней атмосфере // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 2. № 1. С. 153–160. 1962.
- Иванов К.Г. Геомагнитный эффект Тунгусского падения // Метеоритика. Вып. 24. С. 141–151. 1964.
- Иванов К.Г. Еще раз о проблеме моделирования геомагнитного эффекта Тунгусского падения // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 42. № 6. С. 857–858. 2002.
- Идлис Г.М., Карягина З.В. О кометной природе Тунгусского метеорита // Метеоритика. Вып. 21. С. 32–43. 1961.
- Калашников А.Г. О наблюдении магнитного эффекта метеоров индукционным методом // ДАН СССР. Т. 66. № 3. С. 373–376. 1949.
- Калашников А.Г. Магнитный эффект метеоров // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. Вып. 6. С. 7–20. 1952.
- Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. Адушкина В.В. и Немчинова И.В. М.: ИКЦ “Академкнига”. 310 с. 2005.
- Ковалев А.Т., Немчинов И.В., Шувалов В.В. Ионосферные и магнитосферные возмущения в результате падения небольших комет и астероидов // Астрон. вестн. Т. 40. № 1. С. 65–76. 2006.
- Ковалевский А.Ф. К вопросу о механизме геомагнитных эффектов крупных взрывов // Труды Сибирского физико-технического института при Томском университете. Вып. 41. С. 87–91. 1962.
- Ковалевский А.Ф. Магнитный эффект взрыва Тунгусского метеорита // Проблема Тунгусского метеорита. Томск: ТГУ. С. 187–194. 1963.
- Молчанов О.А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. М.: Наука. 224 с. 1985.
- Обашев Г.О. О геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита // Метеоритика. Вып. 21. С. 49–52. 1961.
- Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат. 136 с. 1982.
- Черногор Л.Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина. 386 с. 2009.
- Черногор Л.Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 1. С. 119–132. 2011.
- Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина. 556 с. 2012.
- Черногор Л.Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // Радиофизика и электроника. Т. 4(18). № 3. С. 47–54. 2013а.
- Черногор Л.Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита “Челябинск” // Инженерная физика. № 8. С. 23–40. 2013б.
- Черногор Л.Ф. Основные физические явления при полете Челябинского космического тела // Материалы конференции “Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль”. Международная научно-практическая конференция (Чебаркуль, 21–22 июня 2013 г.). С. 148–152. 2013в.
- Черногор Л.Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 5. С. 658–669. 2014.
- Черногор Л.Ф. Магнито-ионосферные эффекты метеороидного плюма // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 1. С. 125–132. 2018а.
- Черногор Л.Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 2. С. 267–280. 2018б.
- Brown P., Spalding R.E., Re Velle D.O., Tagliaferri E. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. V. 420. P. 294–296. 2002.
- Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects / Adushkin V., Nemchinov I. (Eds.) // Comprehensive overview of the threat posed by the impact of an asteroid or comet on Earth, XI + 357 p. 2008.
- Center for Near Earth Object Studies [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/> Дата доступа: 12.03.2019.
- Chernogor L.F., Blaunstein N. Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment. Boca Raton, London, N.Y.: CRC Press. Taylor & Francis Group. 542 p. 2013.
- Infrasound monitoring for atmospheric studies / Le Pichon A., Hauchecorne A., Blanc E. (Eds.). Dordrecht, Heidelberg, London, N.Y.: Springer. 734 p. 2010.
- Space Weather Prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>. Дата обращения: 18.02.2019.