

УДК 533.95.3:550.338.2:550.388:8:553.51

ВОЗМУЩЕНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ПАДЕНИИ ЛИПЕЦКОГО (21.06.2018 г.) И ЧЕЛЯБИНСКОГО (15.02.2013 г.) МЕТЕОРИТОВ

А. А. Спивак*, С. А. Рябова**

Представлено академиком РАН В. В. Адушкиным 22.08.2018 г.

Поступило 28.08.2018 г.

На примере Челябинского (13.02.2013 г.) и Липецкого (21.06.2018 г.) событий рассмотрены флуктуации геомагнитного поля, сопровождающие падение метеоритов в атмосфере Земли. С использованием данных магнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ и Геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН, расположенных в средних широтах, показано, что в целом падение метеоритов в атмосфере Земли вызывает вариации магнитной индукции амплитудой до 5 нТл на расстояниях до 2700 км от места падения космического тела. Установлено, что максимум эффекта достигается с задержкой от ~5 до ~10 мин, длительность периода наведённых геомагнитных возмущений составляет от ~5 до ~20 мин. Предложены оценочные зависимости амплитуды и длительности наведённых геомагнитных вариаций от расстояния до места падения метеорита.

Ключевые слова: геомагнитное поле, метеорит, атмосфера, вариация.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524853361-365>

Падение метеоритов в атмосфере Земли сопровождается рядом геофизических эффектов, в частности краткосрочных, связанных с нагревом воздушных масс, образованием ударных волн, процессами абляции, электромагнитного излучения и т.д. [1, 2]. При этом в основном исследуются и разрабатываются модели тех процессов, которые протекают в локальной области, характеризующейся сильными возмущениями среды и полей [3–6].

В настоящей работе на примере Челябинского (13.02.2013 г.) [2, 6] и Липецкого (21.06.2018 г.) [7] событий рассматриваются нелокальные геомагнитные эффекты в приземном слое атмосферы, вызванные падением метеоритов.

Интерес к геофизическим явлениям, сопровождающим падение космических тел, связан с изучением проблемы астероидной и кометной опасности [1, 8]. Поскольку крупномасштабные события, такие как, например, Тунгусское событие 30.06.1908 г., весьма редки, основное внимание в настоящее время нацелено на изучение космических тел размером от первых метров до первых десятков метров.

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что падение метеоритов на Землю сопровождается электромагнитными возмущениями [1, 5, 9, 10]. Предложен ряд механизмов и разработаны модели про-

цесса возбуждения электромагнитного сигнала [4, 11, 12]. Однако теоретические модели не в полной мере описывают многие свойства низкочастотных электромагнитных сигналов, что связано с явным недостатком наблюдательной информации, которая востребована не только при тестировании и совершенствовании теории, но также при разработке новых подходов к описанию физических процессов, сопровождающих падение метеоритов.

Среди геофизических эффектов, вызванных падением метеоритов на Землю, нас заинтересовал геомагнитный эффект этого явления. В качестве исходных в настоящей работе были использованы данные регистрации трёх компонент магнитной индукции на земной поверхности, выполненной в некоторых среднеширотных обсерваториях международного объединения ИНТЕРМАГНЕТ, а также в условиях геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН (МНУ) [13, 14] (табл. 1). Расположение пунктов магнитной регистрации приведено на рис. 1. Для анализа использованы ряды цифровых данных, сформированные с дискретностью 1 мин.

Следует отметить, что рассматриваемые события 15.02.2013 г. (Челябинский метеорит) и 21.06.2018 г. (Липецкий метеорит) произошли в условиях спокойной геомагнитной обстановки (табл. 2), что существенно упростило анализ геомагнитных вариаций, вызванных падением космических тел.

В качестве примера на рис. 2 приведена запись компонент B_x , B_y и B_z магнитной индукции вблизи

Институт динамики геосфер

Российской Академии наук, Москва

*E-mail: spivak@idg.chph.ras.ru

**E-mail: riabovasa@mail.ru

Таблица 1. Пункты геомагнитных наблюдений

Пункт	Обозначение	С.ш., град	В.д., град
Арти*	ARS	56,433	58,56
Бельск*	BEL	51,84	20,79
Борок*	BOX	58,07	38,23
Киев*	KIV	50,72	30,3
Львов*	LVV	49,9	23,75
Михнево	MHV	54,94	37,73
Новосибирск*	NVS	54,85	83,23
Иркутск*	IRT	54,27	104,45

Примечание. Звёздочкой отмечены магнитные обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ.

Таблица 2. Значения индекса геомагнитной активности K по данным обсерватории MHV

t , ч (UT)	K	
	15.02.2013 г.	21.06.2018 г.
0–3	0	0
3–6	0	1
6–9	0	0
9–12	1	2
12–15	1	1
15–18	2	1
18–21	3	0
21–24	2	0

Примечание. www.idg-comp.chph.ras.ru/~mikhnevo/

земной поверхности в условиях обсерватории MHV в период падения Липецкого метеорита*. На рис. 3 приведены горизонтальные компоненты магнитной индукции для этого же события по данным станций ИНТЕРМАГНЕТ.

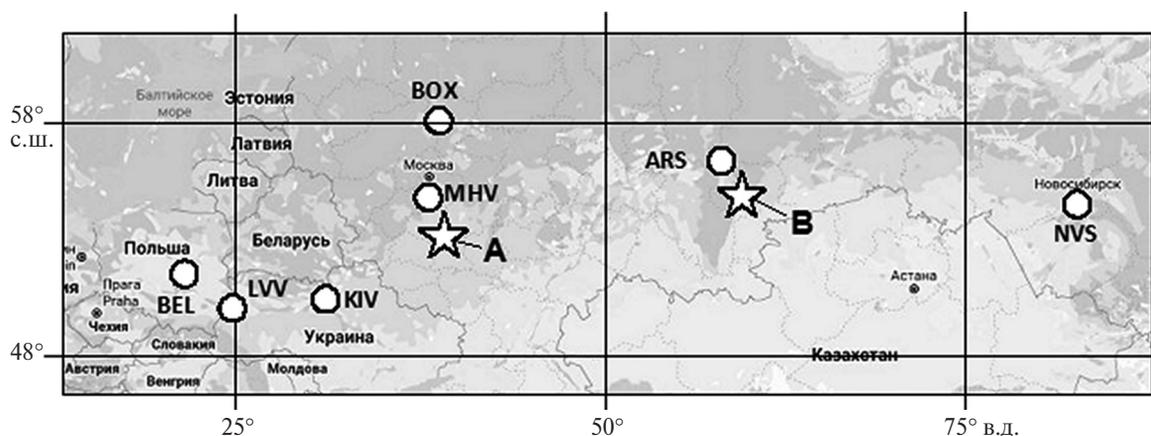
Примеры вариации модуля индукции $B_0 = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ в период падения Челябинского

Таблица 3. Характеристики наведенных геомагнитных возмущений

Пункт наблюдения	t_0 , UT	t_m , UT	T , мин	B_h , нТл	R , км
Челябинское событие (15.02.2013 г.)					
ARS	3:16	3:24	11	1,9	100
BEL	3:23	3:26	11	1,1	2500
BOX	3:18	3:26	18	2,6	1300
IRT	3:20	3:25	18	0,8	2000
KIV	3:18	3:26	19	1,1	2000
LVV	3:24	3:26	13	0,9	2400
MHV	3:15	3:26	17	2,6	1500
NVS	3:19	3:25	12	0,9	1500
Липецкое событие (21.06.2018 г.)					
BEL	01:29	01:34	15	2,6	1200
BOX	01:29	01:35	15	4,9	670
KIV	01:28	01:34	12	2,3	630
MHV	01:29	01:34	14	3,2–4,5	200

метеорита по данным обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ приведены на рис. 4.

Из рис. 2 и 3 видно, что период падения метеорита характеризуется ярко выраженными флуктуациями компонент B_x и B_y (бухтообразное понижение) и, в частности, повышенными значениями компоненты B_z . Начало наведённых геомагнитных вариаций близко ко времени падения Липецкого метеорита $t_0 \sim 01:20$ UT, установленного на основе фоторегистрации**. Максимальный геомагнитный эффект достигается с некоторой характерной для этого процесса задержкой [9], которая в данном случае составляет около 5 мин. Затем величина вариаций магнитного поля возвращается к своим невозмущённым значениям. Амплитуда наведённых

**Рис. 1.** Расположение пунктов магнитной регистрации (звёздочками обозначены места падения Липецкого (А) и Челябинского (В) метеоритов).

* Система координат: ось X направлена на географический север, Y — на восток, Z — вертикально вниз.

** Синхронность регистрации сигнала на разнесённых в пространстве пунктах наблюдений является дополнительным подтверждением.

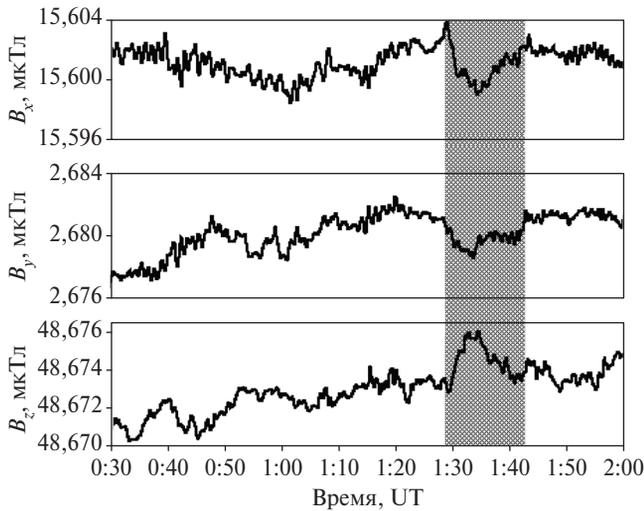


Рис. 2. Вариации компонент индукции геомагнитного поля в период падения Липецкого метеорита (регистрация в обсерватории МНУ). Фоном помечен период наведённых возмущений магнитного поля.

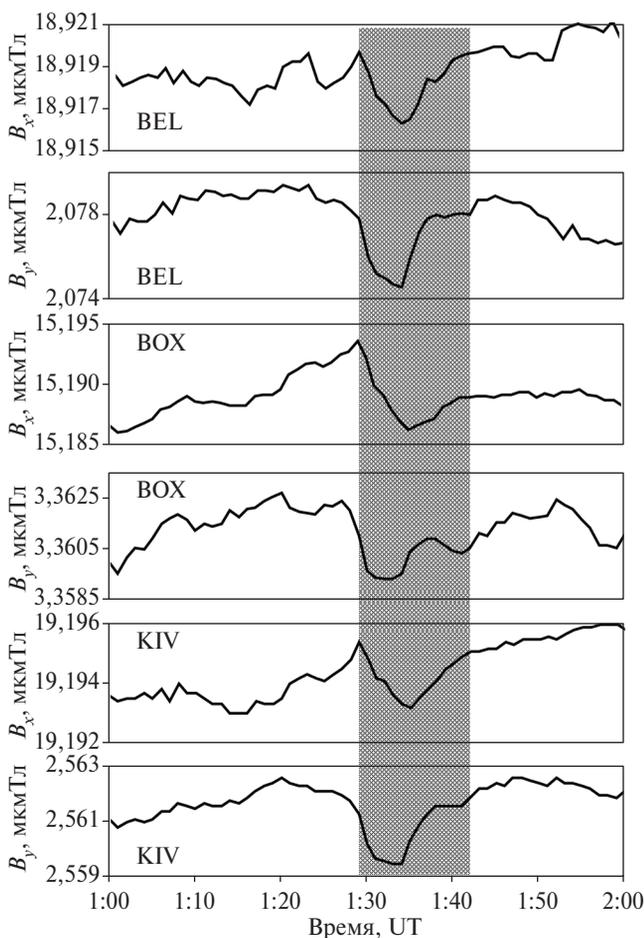


Рис. 3. Вариации горизонтальных компонент магнитной индукции в период падения Липецкого метеорита (данные магнитных обсерваторий сети ИНТЕРМАГ-НЕТ: BEL, BOX и KIV). Фоном помечен период наведённых возмущений магнитного поля.

вариаций компонент B_x , B_y и B_z по записям в МНУ составляет соответственно $\sim 4,5$; $\sim 3,5$ и ~ 3 нТл.

Из данных рис. 4 следует, что в период падения Челябинского метеорита ($t_0 \sim 03:20$ UT [2, 5, 6]) наблюдаются выделяющиеся на фоне обычных повышенные вариации геомагнитного поля, причём на значительных расстояниях R от места падения космического тела (табл. 3). При этом амплитуда наведённых изменений модуля горизонтальной компоненты $B_h = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$ вектора магнитной индукции B_h^* (табл. 3) колеблется в интервале от ~ 1 до $\sim 4,9$ нТл при неопределённости значений не хуже 20%. При этом обнаруживается тенденция к уменьшению величины B_h^* с расстоянием R . Согласно оценкам зависимость $B_h^*(R)$ имеет вид

$$B_h^* \sim 17,3R^{-0,3} \text{ нТл},$$

где R измеряется в км.

Результаты регистрации свидетельствуют о том, что длительность T наведённых геомагнитных вариаций изменяется в достаточно узком интервале от ~ 11 до ~ 19 мин (табл. 3), что значительно превышает время свечения болидов (секунды — десятки секунд). Это скорее всего обусловлено последствием наиболее активной стадии падения рассматриваемых метеоритов, которая завершается формированием разогретого облака следа, состоящего из мелких фрагментов метеорита и паров, либо релаксационными процессами в возбуждённой ионосфере и магнитосфере. Длительность наведённых геомагнитных возмущений в целом имеет тенденцию к увеличению с расстоянием R до мест падения космических тел. Согласно оценкам зависимость $T(R)$ имеет вид

$$T \approx 8,8R^{0,07} \text{ мин},$$

где R измеряется в км.

Несмотря на различающиеся углы траектории метеоритов в атмосфере (менее 20° к горизонту для Челябинского и примерно 70° для Липецкого метеоритов), следует отметить схожий характер вариаций геофизических полей для этих двух событий.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что падение метеоритов в атмосфере Земли сопровождается нелокальным геомагнитным эффектом, который проявляется на значительных расстояниях от места падения космических тел. Установленные амплитуды и характерные времена наведённых геомагнитных вариаций могут представлять интерес при разработке моделей геофизических процессов, сопровождающих падение космических тел на Землю.

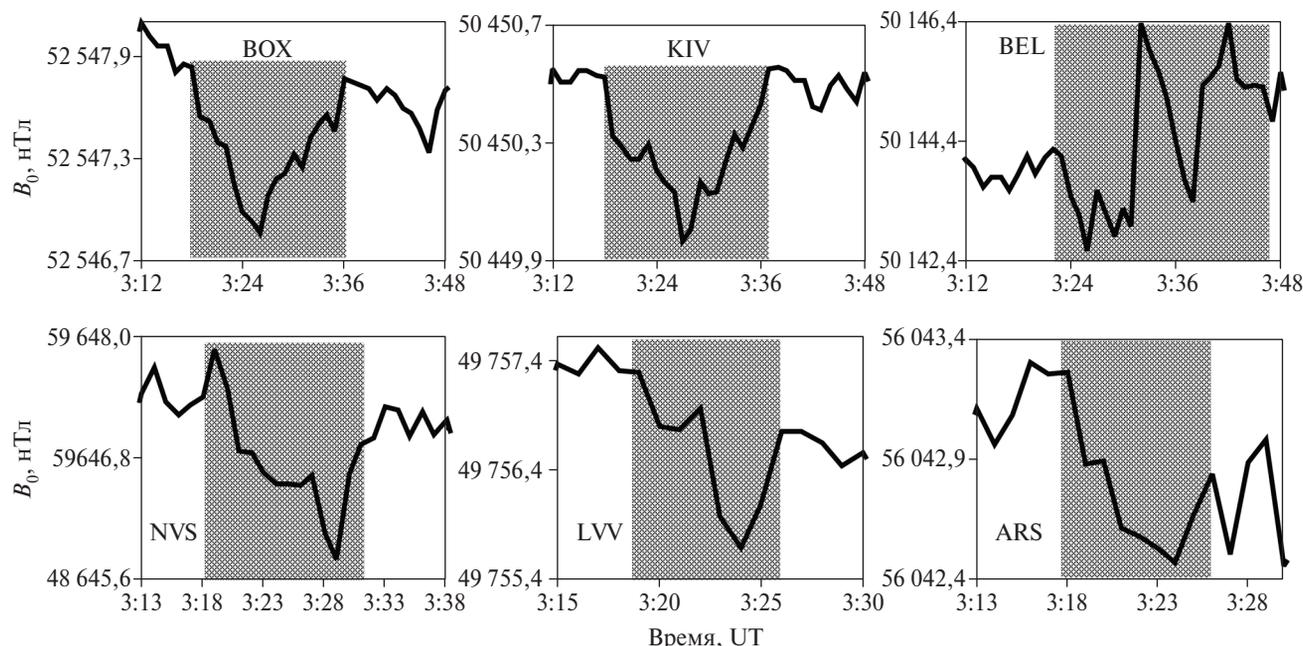


Рис. 4. Вариации модуля индукции геомагнитного поля в период падения Челябинского метеорита (данные обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ). Фоном помечен период наведённых возмущений магнитного поля.

Источник финансирования. Исследования выполнены по Программе фундаментальных исследований президиума РАН № 19 “Фундаментальные проблемы геолого-геофизического изучения литосферных процессов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adushkin V.V., Nimchinov I.V.* Consequences of Impacts of Cosmic Bodies on the Surface of the Earth. In: *Hazards due to Comets and Asteroids*. Tucson; L.: Univ. Arizona Press, 1994. P. 721–778.
2. *Бернгардт О.И., Добрынина А.А., Жеребцов Г.А., Михалев А.В., Первалова Н.П., Ратовский К.Г., Рахматулин Р.А., Саньков В.А., Сорокин А.Г.* Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // *ДАН*. 2013. Т. 452. № 2. С. 205–207.
3. *Toon O.B., Zahnle K., Morrison D., Turco R.P., Sevey C.* Environmental Perturbations Caused by the Impacts of Asteroids and Comets // *Rev. Geophys.* 1997. V. 35. P. 41–78.
4. *Ковалева И.Х., Ковалев А.Т., Попова О.П., Рыбнов Ю.С., Поклад Ю.В., Егоров Д.В.* Электромагнитные эффекты, генерируемые в ионосфере Земли при падении метеороида. В сб.: *Динамические процессы в геосферах*. М.: Геос, 2014. В. 5. С. 26–47.
5. *Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.И. и др.* *Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г.* // *Астрон. вестн.* 2013. Т. 47. № 3/4. С. 1–16.
6. *Popova O.P. and 59 co-authors.* Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // *Science*. 2013. V. 342. № 6162. P. 1069–1073.
7. <https://www.nasa.gov/subject/3156/meteors-meteorites/>
8. *Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра* / Под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. М.: Физматгиз, 2010. 384 с.
9. *Лосева Т.В., Кузьмичева М.Ю.* Оценка геомагнитного эффекта при Тунгусском событии 1908 года. В сб.: *Физика межгеосферных взаимодействий*. М.: Геос, 2010. С. 261–269.
10. *Broshten V.A.* A Magnetohydrodynamic Mechanism for Generating Radio Waves by Bright Fireballs // *Sol. Sys. Res.* 1983. V. 17. P. 70–74.
11. *Broshten V.A.* Electrical and Electromagnetic Phenomena Associated with the Meteor Flight // *Sol. Sys. Res.* 1991. V. 25. P. 93–104.
12. *Price C., Blum M.* ELF/VLF Radiation Produced by the 1999 Leonid Meteors // *Earth, Moon, Planets*. 2000. V. 82/83. P. 545–554.
13. *Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю.* “Михнево”: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // *Физика Земли*. 2016. № 1. С. 108–119.
14. *Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю.* Геоинформатика и наблюдения магнитного поля Земли: российский сегмент // *Физика Земли*. 2015. № 2. С. 3–20.

**GEOMAGNETIC FIELD DISTURBANCES
FROM THE FALL OF THE LIPETSK (JUNE 21, 2018)
AND CHELYABINSK (FEBRUARY 15, 2013) METEORITES**

A. A. Spivak, S. A. Riabova

Institute for Dynamics of Geospheres of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin August 22, 2018

Received August 28, 2018

Based on the Chelyabinsk (February 13, 2013) and Lipetsk (June 21, 2018) events, disturbances in the Earth's geomagnetic field, which were induced by the fall of these meteorites, were studied. Based on the data provided by geomagnetic observatories of the INTERMAGNET network and the mid-latitude Mikhnevo geophysical observatory (IDG RAS), it was established that the fall of meteorites through the Earth's atmosphere, in general, induces geomagnetic disturbances of up to 5 nT at distances up to 2700 km from the impact point of a cosmic body; the maximum effect is reached with a delay time ranging from ~5 to ~10 min, and the duration of the period of the induced geomagnetic field disturbances varies from ~5 to ~20 min. The estimation dependencies of the amplitude and duration of induced geomagnetic disturbances from a distance from the meteorite impact points are proposed.

Keywords: geomagnetic field, meteorite, atmosphere, variation.