

ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ ПРИ ПАДЕНИИ МЕТЕОРИТОВ

© 2019 г. А. А. Спивак¹, *, С. А. Рябова¹, **

¹Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН), г. Москва, Россия

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

**e-mail: riabovasa@mail.ru

Поступила в редакцию 19.11.2018 г.

После доработки 17.01.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

Анализируются результаты инструментальных наблюдений вариаций магнитного поля Земли, выполненных в ряде обсерваторий международной сети INTERMAGNET и в Геофизической обс. Михнево ИДГ РАН в периоды падения метеоритов. На примерах Витимского (24.09.2002 г.), Челябинского (15.02.2013 г.), Румынского (07.01.2015 г.), Бурятского (25.10.2016 г.), Хакацкого (06.12.2016 г.), С.-Петербургского (11.09.2017 г.) и Липецкого (21.06.2018 г.) событий показан геомагнитный эффект падающих космических тел. Отмечается, что эффект имеет нелокальный характер, возникает одновременно и наблюдается на расстояниях до 7000 км от места падения космического тела. Установлена слабая зависимость амплитуды наведенных геомагнитных вариаций от расстояния до места события. Полученные данные могут представлять интерес при верификации теоретических и расчетных моделей геофизических процессов, сопровождающих падение метеоритов.

DOI: 10.1134/S0016794019050110

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование геофизических эффектов, сопровождающих падение космических тел в атмосфере Земли, представляет значительный интерес не только в связи с оценкой астероидной и кометной опасности, но также при рассмотрении вопросов, связанных с разработкой моделей атмосферы и протекающих в ней явлений и процессов [Астероидно... 2010; Катастрофические..., 2005; Adushkin, Nemchinov, 1994; Binzel, 2000]. При этом особо следует подчеркнуть, что изучение эффектов, вызываемых падением метеоритов последовательно через магнитосферу, ионосферу и атмосферу Земли, позволяет, во-первых, существенно расширить представления о механизмах взаимодействия и преобразования геофизических полей, межгеосферных взаимодействий, а, во-вторых, сформировать экспериментальную основу для верификации теоретических и численных моделей, разрабатываемых для описания реакции геосфер на сильное локальное возмущение [Адушкин, Спивак, 2014; Катастрофические..., 2005].

Известно значительное число работ, посвященных исследованию процессов и явлений, сопутствующих падению космических тел [Адушкин и др., 2004; Бернгард и др., 2013; Кузьмичева и Лосева, 2010; Кузьмичева и др., 2014; Немчинов и др., 1999; Рыбнов и др., 2014; Светцов и др., 2014; Черногор, 2009, 2018; Adushkin and Nemchi-

nov, 1994; Beech, Forschini, 1999; Bronshten, 1983 и др.]. В основном изучается локальная область сильных возмущений, в которой протекают процессы, количественная характеристика которых позволяет оценивать энергию события, а именно: свечение воздушных масс, ударная волна, акустический сигнал, наведенные сейсмические колебания и т.д. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что падение метеоритов в земной атмосфере вызывает также электромагнитные возмущения [Немчинов и др., 1999; Adushkin and Nemchinov, 1994]. Предложен ряд механизмов и разработаны модели процесса возбуждения электромагнитного сигнала [Ковалева и др., 2014; Bronshten, 1991; Keay, 1992; Price and Blum, 2000 и др.]. При этом следует отметить, что теоретические модели не в полной мере описывают многие свойства низкочастотных электромагнитных сигналов. Это связано с явным недостатком наблюдательных данных, которые востребованы не только при тестировании и совершенствовании теории, но и при разработке новых подходов к описанию физических процессов, сопровождающих падение метеоритов. Например, недостаточно подробно освещены вопросы, касающиеся вариаций физических полей — магнитного и электрического.

В настоящей работе анализируются результаты инструментальных наблюдений за геомагнитными вариациями, вызванными падением ряда космических тел (табл. 1).

Таблица 1. Перечень рассматриваемых событий

Наименование	Дата	Ориентировочное время взрыва боида (UT)	Место падения
Витимское	24.09.2002 г.	16:48	Обнаружен на высоте ~ 30 км с координатами 58.21° N, 113.46° E
Челябинское	15.02.2013 г.	03:17	Место максимальной яркости с координатами 54.8° N, 61.1° E
Румынское	07.01.2015 г.	01:06	Обнаружен на высоте ~30 км с координатами 46.7° N, 26.9° E
Бурятское	25.10.2016 г.	~13:10	За Баргузинским хребтом, ближе к оз. Байкал
Хакасское	06.12.2016 г.	~11:50	Бейский район, Хакассия
С.-Петербургское	11.09.2017 г.	18:00	В районе г. Ярсград
Липецкое	21.06.2018 г.	~01:30	~ 200 км севернее г. Елец

Таблица 2. Пункты геомагнитных наблюдений

Наименование пункта наблюдения	Обозначение	Широта, ° N	Долгота, ° E
Арти (Россия)	ARS	56.433	58.56
Бельск (Польша)	BEL	51.84	20.79
Борок (Россия)	BOX	58.07	38.23
Иркутск (Россия)	IRT	54.27	104.45
Киев (Украина)	KIV	50.72	30.3
Львов (Украина)	LVV	49.9	23.75
Михнево* (Россия)	MHV	54.94	37.73
Новосибирск (Россия)	NVS	54.85	83.23
Панагюриште (Болгария)	PAG	47.5	24.2
С.-Петербург (Россия)	SPG	29.458	29.716
Хабаровск (Россия)	KHB	42.39	134.69

Примечание: звездочкой обозначена магнитная obs., не входящая в сеть INTERMAGNET.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных использовались цифровые ряды инструментальных наблюдений, выполненных в среднеширотных обсерваториях сети INTERMAGNET (табл. 2) [Гвишиани и др., 2015; Kerridge, 2001] и Геофизической obs. Михнево (MHV) ИДГ РАН.

Подготовка данных для обработки и анализа заключалась в обнаружении и удалении выбросов (спайков) с привлечением критериев на основе диаграммы “ящик с усами” [Hoaglin et al., 2000], Титъена-Мура [Tietjen and Moore, 1972] и Граббса [Дубров, 2003]. Пропуски во временных реализациях, включая возникшие в результате удаления выбросов, удалялись при их незначительном количестве 1–5 с помощью линейной интерполяции, в случае единичных более продолжительных интервалов пропущенных значений для восстановления ряда применялось двойное преобразование Фурье [Грачев, 2004].

Для анализа использовались ряды цифровых данных, сформированные с дискретностью 1 мин.

3. ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ ПРИ ПАДЕНИИ МЕТЕОРИТОВ

Геомагнитный эффект от падения метеоритов на Землю хорошо известен в основном по описанию и теоретическому моделированию Тунгусского события 30.06.1908 г. [Бронштэн, 2002; Иванов, 1961; Немчинов и др., 1999; Савченко, 1975, 1976]. Однако до настоящего времени отсутствует убедительное физическое объяснение этого феномена. В части работ указывается на наличие геомагнитного эффекта от падения метеоритов [Кузьмичева и Лосева, 2010; Черногор, 2009, 2018]. В других работах отмечается, что геомагнитный эффект при падении метеорита не зафиксирован [Бернгард и др., 2013; Кузьмичева и Лосева, 2013 и др.]. Это вызывает необходимость накопления наблюдательных данных.

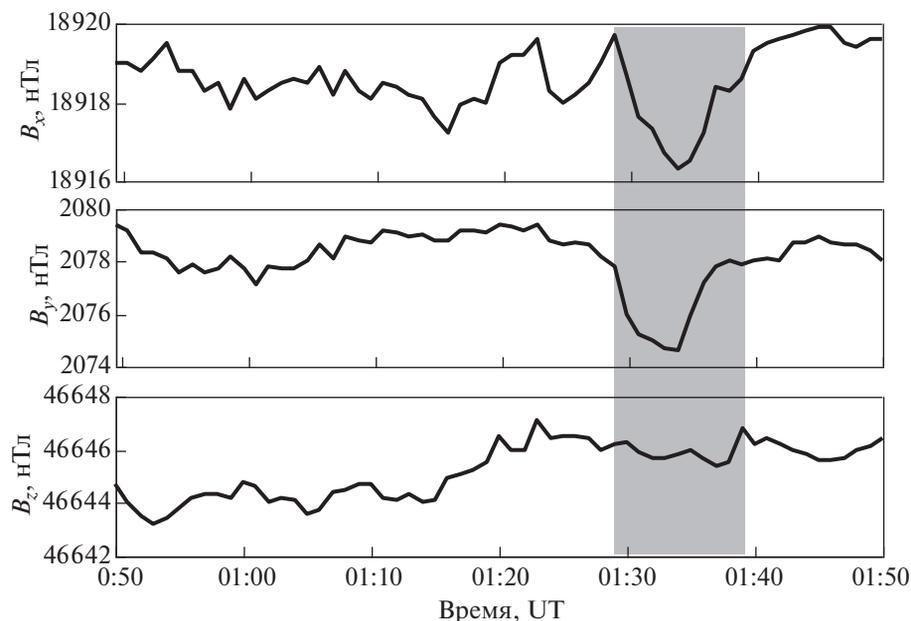


Рис. 1. Вариации компонент геомагнитной индукции в период падения Липецкого метеорита по данным магнитной обс. BEL (период с максимальными вызванными вариациями магнитной индукции обозначен фоном).

Анализ результатов инструментальных наблюдений, выполненный в настоящей работе, показывает, что падение метеоритов в атмосфере Земли сопровождается характерными вариациями магнитного поля. В качестве примера на рис. 1 приведены вариации компонент геомагнитной индукции B_x , B_y и B_z (в системе координат: ось X направлена на географический север, Y – на восток, Z – вертикально вниз) вблизи земной поверхности в период падения Липецкого метеорита по данным среднеширотной обсерватории BEL. Из рисунка 1 следует, что в период $\sim 01:28$ – $01:38$ UT для рассматриваемого случая отмечается бухтообразная вариация магнитной индукции, более ярко выраженная на горизонтальных компонентах B_x и B_y . Следует отметить, что эта закономерность характерна для большинства зарегистрированных событий. В целом, как будет показано ниже, сопутствующие падению метеоритов геомагнитные вариации, зарегистрированные в разных пунктах, могут характеризоваться как отрицательными, так и положительными значениями.

3.1. Витимское событие

Пролет Витимского болида был зафиксирован оптическими и инфракрасными датчиками гео-стационарной системы космических наблюдений США 24.09.2002 г. в 16:48 UT [Адушкин и др., 2004; Черногор, 2009]. Болид был обнаружен в точке с координатами 57.91° N, 112.90° E на высоте ~ 62 км (начало свечения объекта) и прослежен до высоты пролета ~ 30 км (координаты точки, со-

ответствующей окончанию свечения объекта: 58.21° N, 113.46° E) [Язев и Антипин, 2004]. Болид массой ~ 50 т двигался со скоростью ~ 20 км/с [Черногор, 2009]. Согласно имеющимся оценкам энергия взрыва болида составила $\sim 10^{13}$ Дж [Адушкин и др., 2004].

На рисунке 2 приведены вариации модуля магнитной индукции в период падения Витимского болида, откуда следует, что в период $\sim 16:36$ – $16:40$ UT отмечается начало геомагнитных вариаций, заметно превышающих трендовый уровень. По имеющимся данным [Адушкин и др., 2004] взрыв болида (максимум яркости свечения) произошел в 16:48 UT. Из этого следует, что максимум, как предполагается, наведенной болидом вариации магнитного поля, зарегистрированный в обсерватории ИКТ в $\sim 17:00$ UT, запаздывает относительно момента взрыва болида на ~ 12 мин. Вместе с тем, максимум вариации магнитного поля, зарегистрированный в обсерватории BEL (16:48 UT), зарегистрирован в момент взрыва.

Амплитуда вариаций модуля магнитной индукции B_0 составляет по данным обсерваторий ИКТ и BEL соответственно ~ 1.3 и ~ 1.1 нТл (табл. 3).

3.2. Челябинский болид

Считается, что Челябинское событие 15.02.2013 г. является одним из самых крупных после Тунгусского события 1908 г. Космическое тело массой около 7×10^6 кг [Попова и др., 2014] вошло в атмосферу Земли со скоростью ~ 20 км/с [Ророва et al., 2013], вызвав формирование обширного

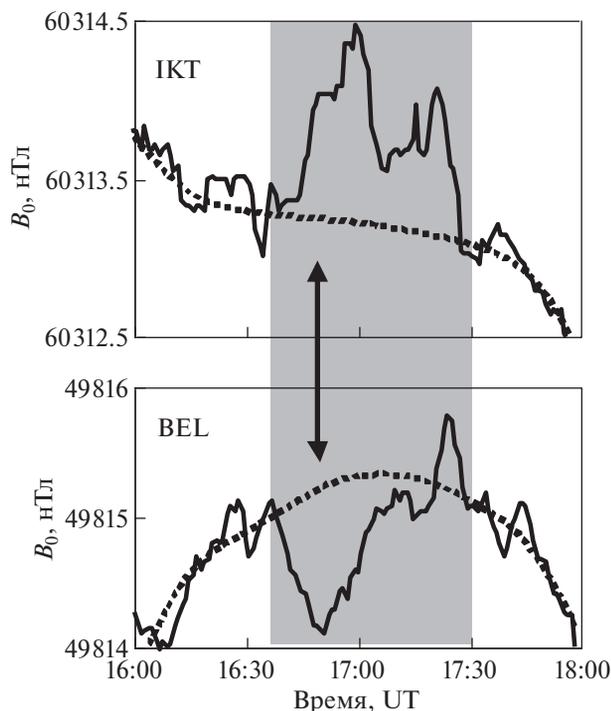


Рис. 2. Вариации модуля геомагнитной индукции в период падения Витимского болида по данным магнитных обсерваторий ИКТ и BEL; стрелкой обозначено время максимальной вспышки (16:48 UT). Пунктир – тренд B_0 .

ионизационного пятна на ионосферных высотах [Ковалева и др., 2014], и взорвалось (самая яркая вспышка) примерно в 03:20 UT на высоте ~ 30 км в точке с координатами 54.85° N, 61.41° E [Бернгардт и др., 2013; Черногор, 2018]. Выполненные оценки позволяют определить энергию основного взрыва в $\sim 1.26 \times 10^{15} - 1.85 \times 10^{15}$ Дж [Адушкин и др., 2017; Емельяненко и др., 2013; Рыбнов и др., 2014; Черногор, 2018].

Характер геомагнитных вариаций, зарегистрированных в некоторых обсерваториях сети INTERMAGNET, приведен на рис. 3. Из рисунка 3 следует, что на всех пунктах регистрации отмечается бухтообразное понижение модуля магнитной индукции в течение достаточно продолжительного времени. Конкретные характеристики наведенных болидом геомагнитных возмущений представлены в табл. 3.

3.4. Румынский болид

Метеороид был зафиксирован многочисленными камерами видеонаблюдений и очевидцами в ночное время 07.01.2015 г. примерно в 01:06 UT. По результатам анализа траектории метеороида на стадии болида скорость космического тела оценивается в ~ 28 км/с [Borovicika et al., 2017]. Взрыв болида произошел на высоте примерно 40 км. С использованием данных работы [Адушкин и др., 2017] энергия болида оценивается в $10^{12} - 5 \times 10^{12}$ Дж. Падение метеороида вызвало характерные вариации магнитного поля на значительных расстояниях от места события (рис. 4). Некоторые характеристики наведенных румынским метеороидом геомагнитных вариаций приведены в табл. 3.

3.5. Бурятское событие

На падение космического тела за Баргузинским хребтом (ближе к оз. Байкал) 25.10.2016 г. примерно в 13:10 UT указывают многочисленные свидетельства (vtinform.com/podrobnosti/98341/). По результатам анализа эффектов, сопровождавших произошедшее событие (в частности, яркости кратковременной вспышки, наблюдавшейся в нескольких районах Бурятии и в Иркутской области, величине скорости движения объекта, как

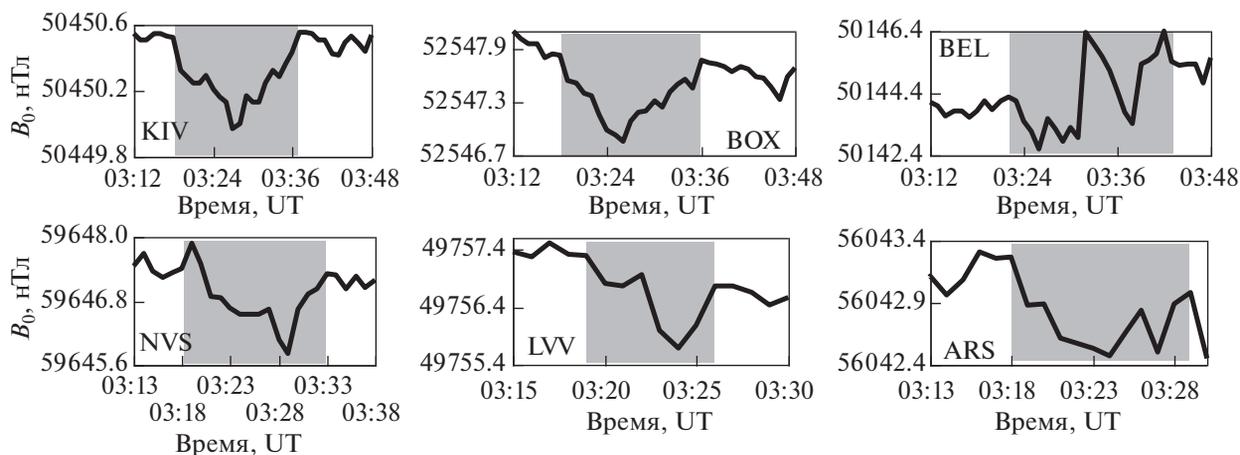


Рис. 3. Вариации модуля геомагнитной индукции в период падения Челябинского болида по данным магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET (фоном обозначен период вызванных вариаций).

Таблица 3. Параметры возмущений магнитной индукции: t_0 – начало вызванных вариаций, t_* – время достижения максимума вариаций, T – длительность вызванных вариаций, B_* – амплитуда вызванных геомагнитных вариаций

Обсерватория	Время t_0 (UT)	Время t_* (UT)	Время T , мин	B_* , нТл
Витимское событие (24.09.2002 г.)				
IKT	16:45	17:00	43	1.3
BEL	16:36	16:48	44	1.1
Челябинское событие (15.02.2013 г.)				
KIV	03:18	03:27	19	0.6
BOX	03:18	03:26	18	~1
BEL	03:23	03:26	20	2.2
NVS	03:19	03:29	14	2.1
LVV	03:19	03:24	7	1.6
ARS	03:18	03:24	8	0.8
Румынское событие (07.01.2015 г.)				
ARS	01:00	01:05	56	2.8
BEL	01:00	01:05	58	~4
BOX	01:00	01:05	57	~5
IRT	01:00	01:03	55	4.1
KHB	01:00	01:10	55	4.6
KIV	01:00	01:05	58	3.8
MHV	01:00	01:04	56	3.4
NVS	01:00	01:03	55	2.9
PAG	01:00	01:05	57	3.7
SPG	01:00	01:05	52	3.7
Бурятское событие (25.10.2016 г.)				
ARS	13:10	13:31	60	86
BOX	13:06	13:19	63	70
KHB	13:26	13:42	70	66
IRT	13:13	13:44	62	60
KIV	13:25	13:47	42	42
NVS	13:08	13:25	70	88
SPG	13:06	13:28	68	~200 (?)
Хакасское событие (06.12.2016 г.)				
ARS	11:56	13:43	~100	49
BEL	11:53	13:40	~100	50
BOX	11:55	14:03	~100	56
IRT	11:50	13:41	~100	50
KHB	11:51	12:49	~100	37
KIV	11:52	13:31	~100	50
NVS	11:50	13:51	~100	49
PAG	11:34	13:46	~100	53
SPG	11:52	14:05	~100	49
MHV	11:50	14:02	~100	52
С.-Петербургское событие (11.09.2017 г.)				
BEL	17:30	18:28	70	38
BOX	17:40	18:29	62	39
KIV	17:43	18:30	65	29
LVV	17:48	18:34	75	31
PAG	17:41	18:31	65	23
SPG	17:39	18:30	70	43
MHV	17:40	18:29	63	30
Липецкое событие (21.06.2018 г.)				
BEL	01:29	01:34	17	3.7
IRT	01:28	01:33	14	~4
KHB	01:28	01:40	18	3.1
KIV	01:29	01:35	13	2.3
SPG	01:29	01:36	15	6.8
MHV	01:29	01:35	14	4.5

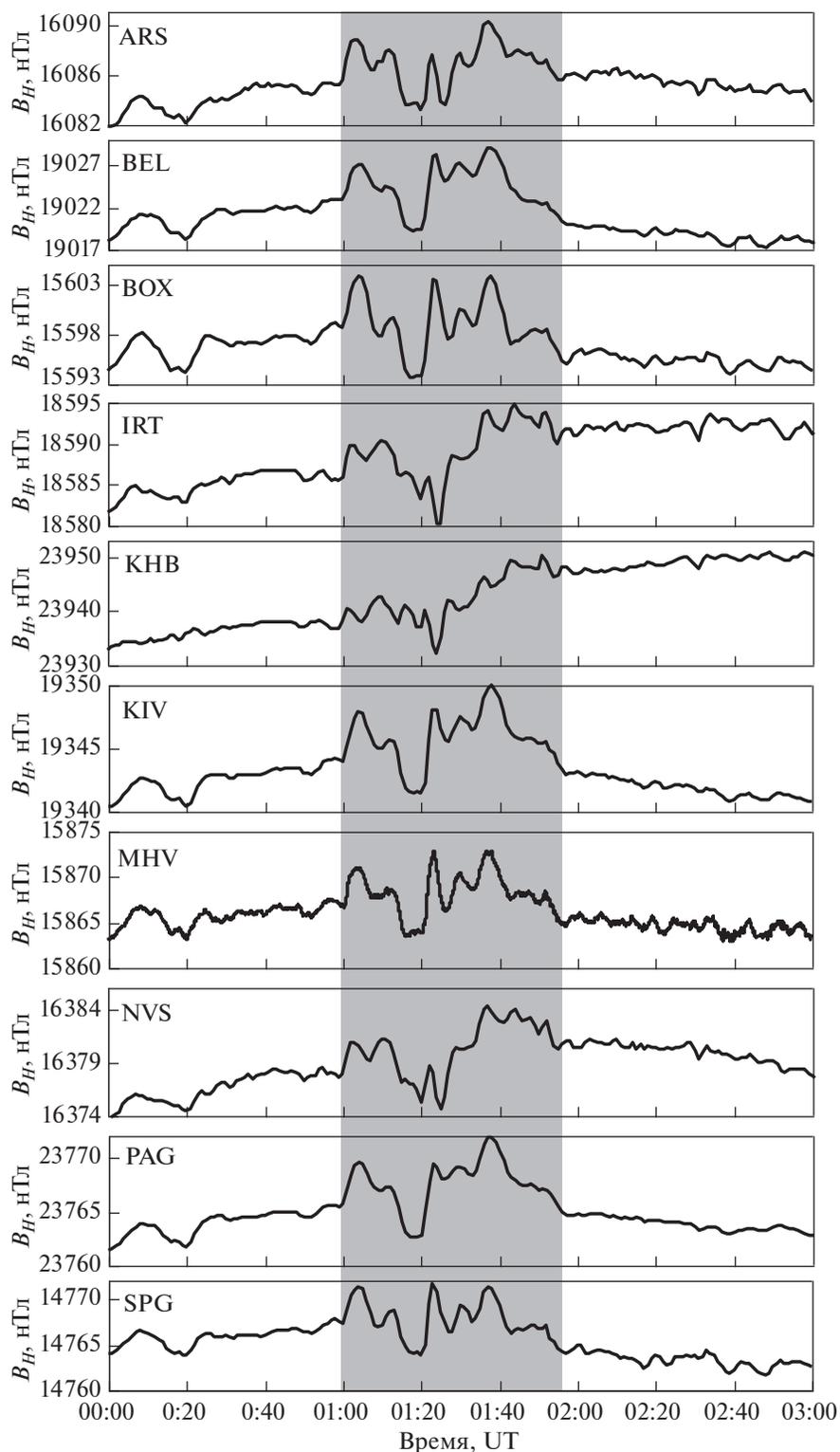


Рис. 4. Вариации модуля горизонтальной компоненты геомагнитной индукции в период падения Румынского болида по данным магнитных обсерваторий INTERMAGNET и обс. MHV (фоном выделены вызванные геомагнитные вариации).

отмечается очевидцами, заведомо превышающей вторую космическую, и найденным позднее фрагментам метеорита) возникшая первоначально версия об искусственном происхождении све-

тящегося тела была вскоре отвергнута (<https://weacom/news/russia/science/188871/>; <https://www.ridus.ru/news/281055/>). Можно полагать, что зарегистрированный объект предположительно яв-

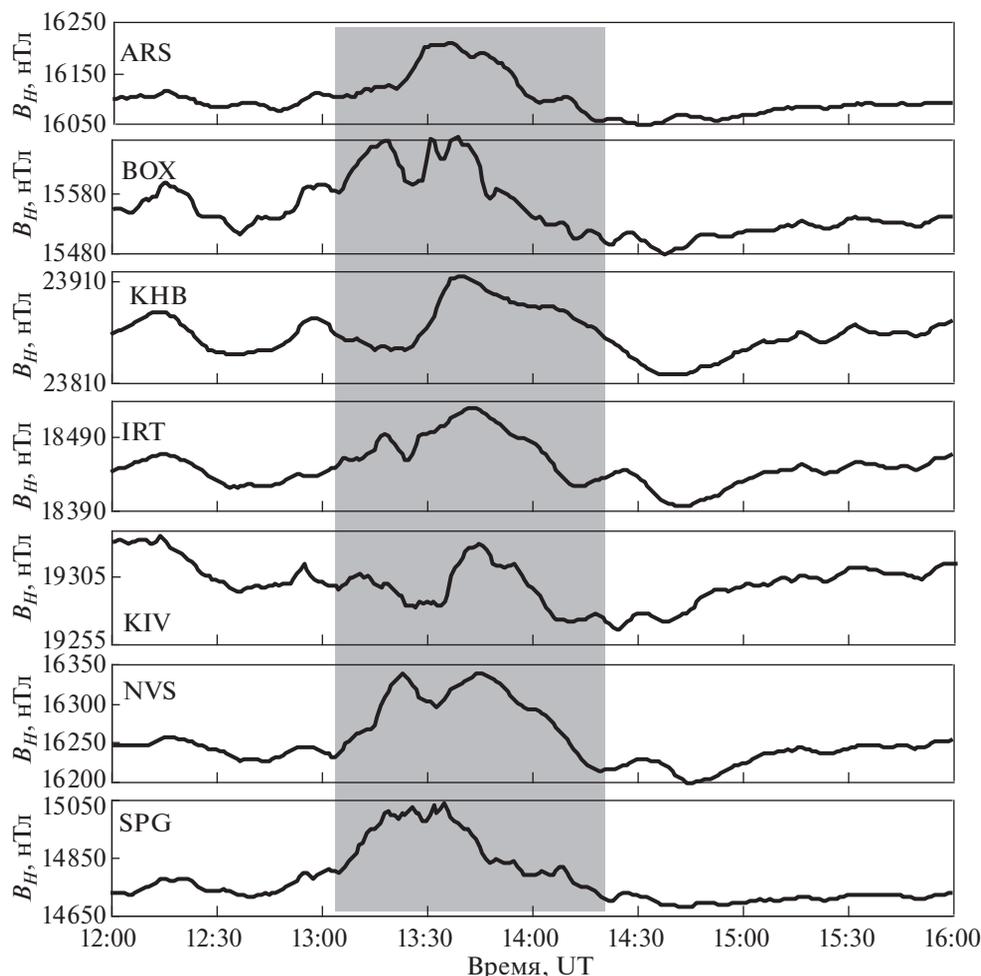


Рис. 5. Вариации модуля горизонтальной компоненты геомагнитной индукции в период Бурятского события по данным магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET (фоном обозначен период вызванных вариаций).

ляется космическим телом из потока Тауриды (<https://tvcom-tv.ru/news/3/58981/>).

В рамках настоящей работы представляет интерес рассмотреть вариации магнитного поля в период падения объекта вне зависимости от его происхождения [Черногор, 2013]. Характер геомагнитных вариаций в период времени, соответствующий пролету объекта, представлен на рис. 5. Действительно, примерно в 13:06–13:10 UT магнитные обсерватории зафиксировали возмущение магнитной индукции значительной амплитуды (максимум наведенной вариации составляет ~60–90 нТл), продолжавшееся ~40–70 мин (табл. 3).

3.6. Хакасское событие (Саяногорский метеорит)

Падение космического тела зафиксировано 06.12.2016 г. примерно в 11:37 UT в Бейском районе Хакасии (<http://tass.ru/kosmos/3846583>). Небесное тело упало в районе долины Бабик недалеко от г. Саяногорск. Падение сопровождалось

свечением и тремя яркими вспышками, свидетельствующими о взрыве болида. Данных о величине энергии космического тела до настоящего времени не имеется.

Как это видно из рис. 6, падение и взрыв болида вызвали существенные вариации магнитного поля Земли на значительных расстояниях. Характеризуя вызванные геомагнитные вариации в целом, следует отметить, что во всех рассматриваемых обсерваториях зафиксировано бухтообразное понижение магнитной индукции примерно на 40–55 нТл в максимуме в течение продолжительного времени длительностью не менее ~3 ч.

3.7. Санкт-Петербургское событие

Наблюдавшийся над г. Санкт-Петербургом и в ряде городов России и Финляндии пролет светящегося космического тела (болида) 11.09.2017 г., предположительно осколка метеорита из потока Персеиды, зарегистрирован многочисленными

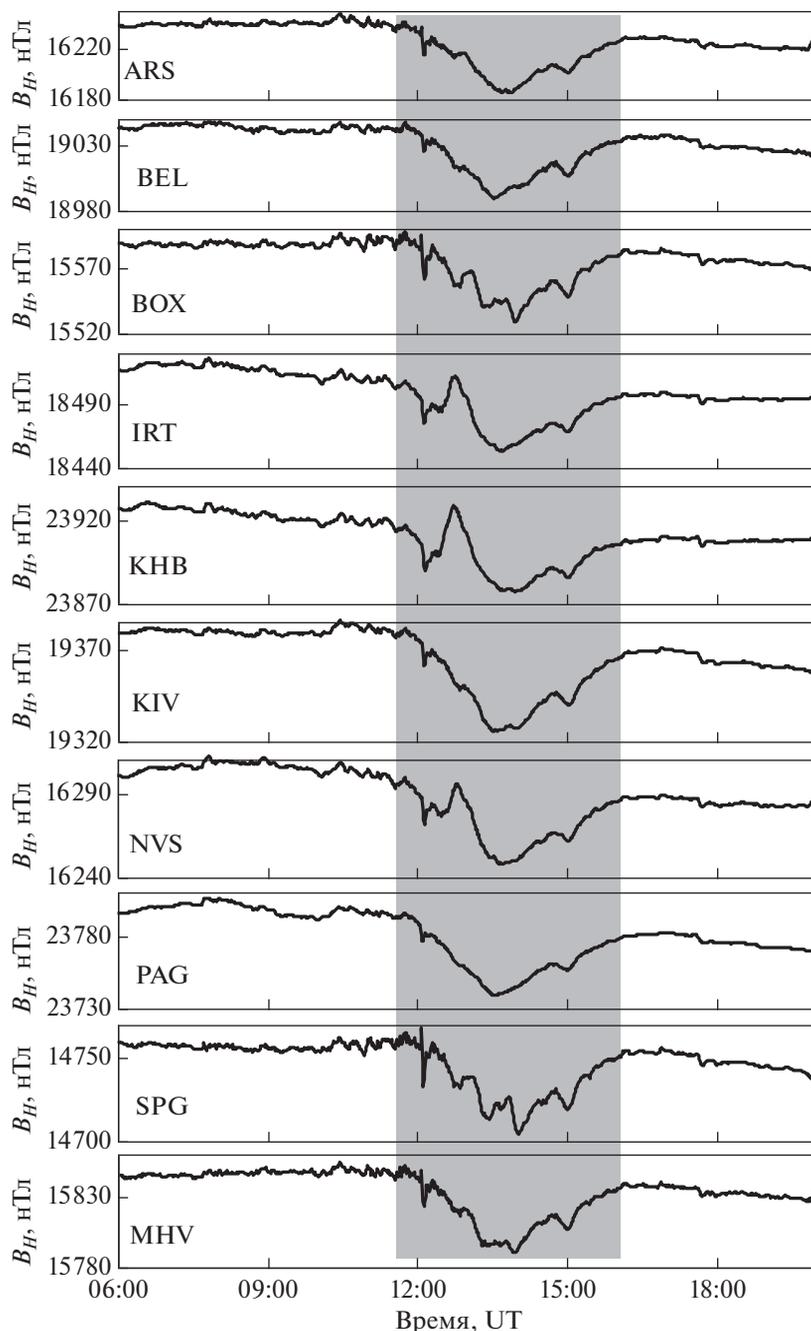


Рис. 6. Вариации модуля горизонтальной компоненты геомагнитной индукции в период Хакасского события по данным магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET и obs. MHV (фоном обозначен период вызванных вариаций).

видеорегистраторами (<http://earth-chronicles.ru/news/2017-09-12-108140>). Предполагается, что это был метровый болид массой ~ 1 т, движущийся со скоростью в десятки километров в секунду.

Особенности геомагнитных вариаций, зарегистрированных магнитными обсерваториями в период рассматриваемого события, демонстрирует рис. 7, из которого видно, что примерно в 17:40 UT характер геомагнитных вариаций изменяется, а именно: отмечается повышение магнитной ин-

дукции. Максимум вариации достигает ~ 30 – 40 нТл через ~ 40 – 45 мин после начала. Длительность предположительно наведенных вариаций составляет ~ 2.5 ч (табл. 3).

3.8. Липецкий болид

Примерно в 01:30 UT 21.06.2018 г. в районе г. Липецк НАСА (США) зарегистрировало пролет крупного космического тела, завершившего-

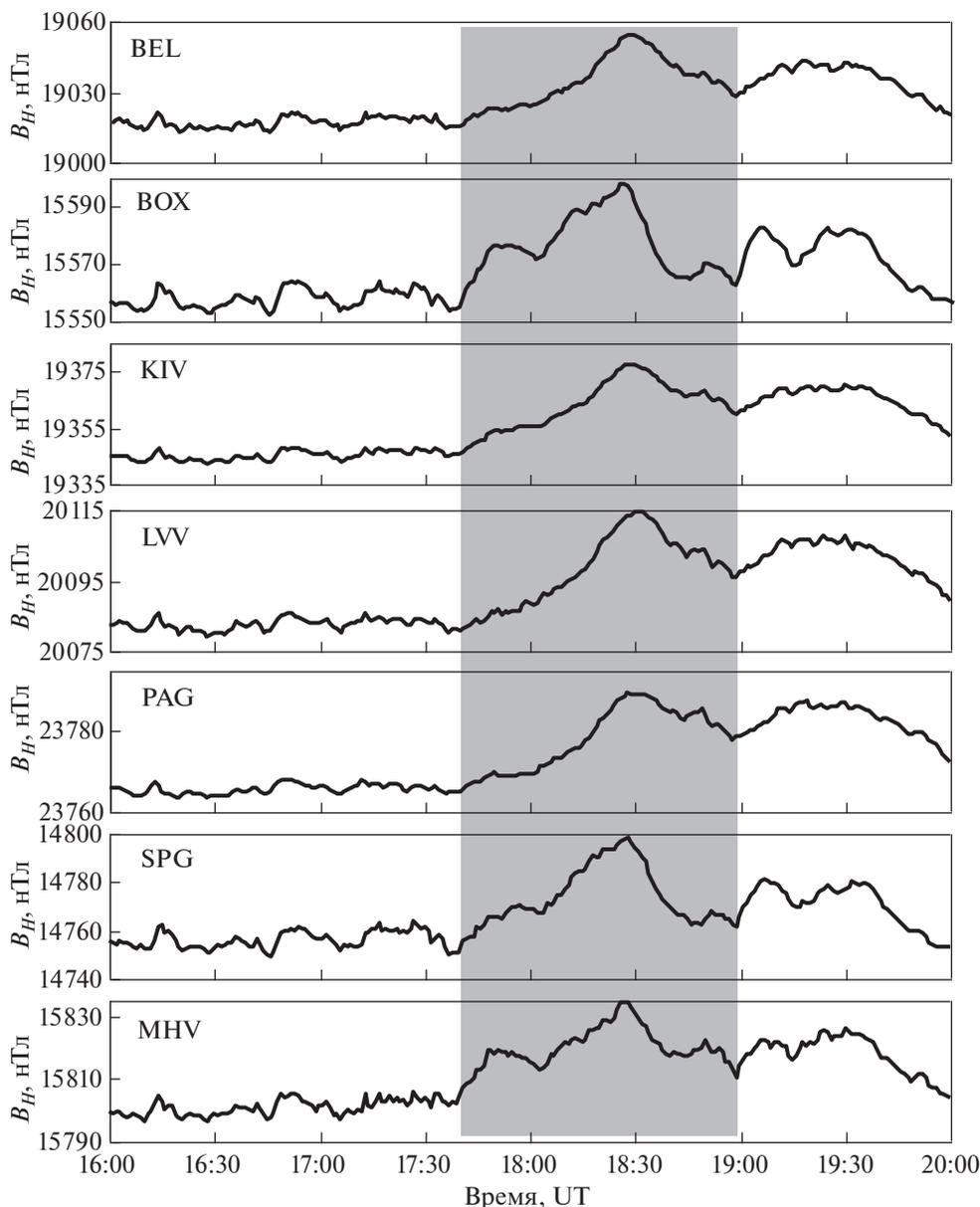


Рис. 7. Вариации модуля горизонтальной компоненты геомагнитной индукции в период С.-Петербургского события по данным магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET и обс. MHV (фоном обозначен период вызванных вариаций).

ся яркой вспышкой (взрывом) и формированием инверсионного следа (<https://www.nasa.gov/>; <https://speos.jpl.nasa.gov/fireballs/>). Позднее подтвердилось, что это событие связано с падением на Землю метеорита, размером не менее 3-х метров, летевшего со скоростью ~ 15 км/с и взорвавшегося на высоте ~ 27 км. Энергия болида была оценена в $\sim 10^{13}$ Дж. В результате поисков на месте падения метеорита недалеко от г. Елец было найдено около 5 кг фрагментов космического тела (<https://rg.ru/2018/07/24/reg-urfo/lipeckij-meteorit>).

Геофизические явления, вызванные достаточно мощным воздействием со стороны болида,

включают помимо прочего геомагнитные эффекты, зарегистрированные магнитными обсерваториями, расположенными на средних широтах. Примеры вариаций магнитной индукции в период пролета болида представлены на рис. 8, из которого следует, что в $\sim 01:30$ UT происходило резкое изменение хода магнитного поля с формированием бухтообразного уменьшения магнитной индукции длительностью около 15 мин. При этом амплитуда наведенной вариации (табл. 3) составляет величину от 2.3 до 6.8 нТл и, следовательно, в целом можно считать, что данные, полученные в обсерваториях, расположенных на значитель-

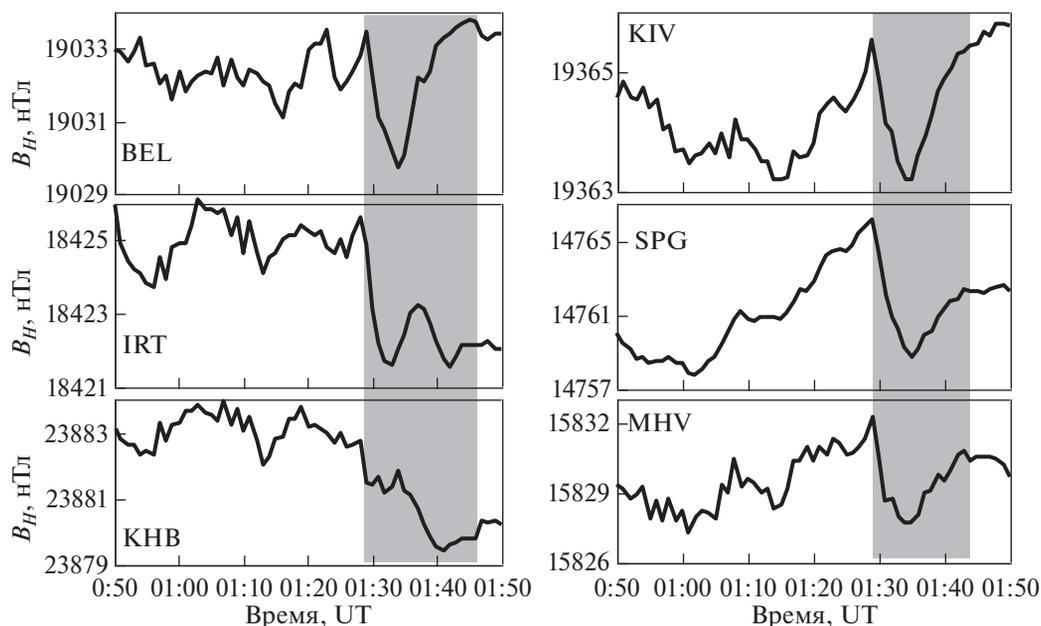


Рис. 8. Вариации модуля горизонтальной компоненты геомагнитной индукции в период падения Липецкого болида по данным магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET и obs. MHV (фоном обозначен период вызванных вариаций).

ном расстоянии друг от друга (табл. 2) и, соответственно, от места события не сильно отличаются.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о наличии хорошо выраженного геомагнитного эффекта падающих на Землю космических тел рассматриваемого класса. При этом следует отметить, что характер наведенных вариаций магнитного поля может отличаться для разных событий. В одних случаях изменение магнитного поля имеет, в целом, положительный знак, в других – регистрируется бухтообразное уменьшение магнитной индукции, либо знакопеременный характер вариаций, как это демонстрируют результаты наблюдений, выполненных при падении Румынского болида (рис. 5).

В целом пролет и взрыв метеорита оказывает определенное влияние на горизонтальную компоненту магнитного поля Земли. Также обращает на себя внимание тот факт, что в трех событиях (Бурятское, Хакасское и Санкт-Петербургское) амплитуда вызванных геомагнитных вариаций на порядок и более превышает аналогичные характеристики для других событий, что требует дальнейшего, более детального изучения рассматриваемого явления с привлечением дополнительной информации.

Особенностью наведенных метеоритами геомагнитных вариаций является слабая зависимость их амплитуды от расстояния до места события, что свидетельствует о нелокальности источ-

ника возмущений. Можно предполагать, что, вероятнее всего, геомагнитные вариации вызываются нарушением токовых систем в значительной по объему области.

Все это свидетельствует о сложности процессов, сопутствующих падению метеоритов. По всей видимости, при разработке теоретических и численных моделей необходимо учитывать многие факторы, такие как азимут и угол вхождения космического объекта в магнитосферу и атмосферу Земли, скорость движения, высота взрыва и т.д. Представляется, что приведенные в настоящей работе данные будут полезны при верификации таких моделей.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Попова О.П., Рыбнов Ю.С., Кудрявцев В.И., Мальцев А.Л., Харламов В.А. Геофизические эффекты Витимского болида 24.09.2022 г. // Докл. АН. Т. 397. № 5. С. 685–688. 2004.
- Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А., Харламов В.А. Оценка энергии источников инфразвуковых возмущений в атмосфере по спектру волновых форм // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС. С. 416–426. 2017.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 360 с. 2014.

- Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. Ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. М.: ФИЗМАТЛИТ. 384 с. 2010.
- Бернгард О.И., Добрынина А.А., Жеребцов Г.А., Михалев А.В., Перевалова Н.П., Ратовский К.Г., Рахматуллин Р.А., Саньков В.А., Сорокин А.Г. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеорита // Докл. АН. Т. 452. № 2. С. 205–207. 2013.
- Бронштэн В.А. Магнитный эффект Тунгусского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 6. С. 854–856. 2002.
- Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Геоинформатика и наблюдения магнитного поля Земли: российский сегмент // Физика Земли. № 2. С. 3–20. 2015.
- Грачев А.В. К восстановлению пропусков в экспериментальных данных // Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Сер. Радиофиз. Нижний Новгород: ННГУ. Вып. 2. С. 15–23. 2004.
- Дубров А.М. Многомерные статистические методы: учебник для студентов экономических специальностей высших учебных заведений. Ред. А.М. Дубров, В.С. Мхитарян, Л.И. Трошин. М.: Финансы и статистика, 351 с. 2003.
- Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрон. вестн. Т. 47. № 4. С. 262–277. 2013.
- Иванов К.Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита // Метеоритика. Вып. 21. С. 46–48. 1961.
- Катастрофические воздействия космических тел. Ред. В.В. Адушкина, И.В. Немчинова. М.: ИКЦ “Академкнига”. 310 с. 2005.
- Ковалева И.Х., Ковалев А.Т., Попова О.П. и др. Электромагнитные эффекты, генерируемые в ионосфере Земли при падении метеоритов // Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. С. 26–47. 2014.
- Кузьмичева М.Ю., Лосева Т.В. Оценка геомагнитного эффекта при Тунгусском событии 1908 г. // Динамические процессы в геосферах. М.: ГЕОС. С. 261–269. 2010.
- Кузьмичева М.Ю., Лосева Т.В. Глобальные ионосферные эффекты, вызванные Челябинским событием 15.02.2013 г. // Динамические процессы в геосферах. Вып. 4. М.: ГЕОС. С. 32–41. 2013.
- Кузьмичева М.Ю., Лосева Т.В., Ляхов А.Н. Ионосферный эффект Челябинского события // Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. С. 86–95. 2014.
- Немчинов И.В., Лосева Т.В., Меркин В.Г. Оценка геомагнитного эффекта при падении Тунгусского метеороида // Физические процессы в геосферах: их проявления и взаимодействие. М.: ИДГ РАН. С. 324–338. 1999.
- Попова О.П., Дженнискенс П., Глазачев Д.О. Фрагментация Челябинского метеороида // Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. М.: ГЕОС. С. 59–78. 2014.
- Рыбнов Ю.С., Попова О.П., Харламов В.А. Оценка энергии Челябинского болида по спектру мощности длиннопериодных колебаний атмосферного давления // Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. М.: ГЕОС. С. 78–85. 2014.
- Савченко Ю.Н. Геомагнитные возмущения, вызываемые ударными волнами крупных метеорных тел. I // Геомагнетизм и аэрономия. № 6. С. 1047–1053. 1975.
- Савченко Ю.Н. Геомагнитные возмущения, вызываемые ударными волнами крупных метеорных тел. II // Геомагнетизм и аэрономия. № 6. С. 518–525. 1976.
- Светцов В.В., Артемьева Н.А., Попова О.П., Шувалов В.В. Падение Челябинского метеорита – типичное событие в истории Земли // Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. М.: ГЕОС. С. 7–20. 2014.
- Черногор Л.Ф. Физические процессы, сопутствующие пролету Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Вестн. астрон. школы. Т. 6. № 1. С. 30–43. 2009.
- Черногор Л.Ф. Геомагнитный эффект стартов и полетов крупных космических аппаратов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 6. С. 455–469. 2013.
- Черногор Л.Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 2. С. 267–280. 2018.
- Язев С.А., Антунин В.С. По следам Витимского болида // Земля и Вселенная. № 5. С. 59–72. 2004.
- Adushkin V.V., Nemchinov I.V. Consequences of impacts of cosmic bodies on the surface of the Earth // Hazards due to Comets and Asteroids / Ed. T. Gehrels. Tucson; London: Univ. Arizona Press. P. 721–778. 1994.
- Beech M., Foschini L.A. A space charge model for electrophonic busters // Astron. Astrophys. V. 345. L27–L31. 1999.
- Binzel R.P. The Torino impact hazard scale // Planet. Space Sci. V. 48. P. 297–303. 2000.
- Borovicka J., Spurny P., Grigore V.I. The January 7, 2015, superbolide over Romania and structural diversity of meter-sized asteroids // Planet. Space Sci. V. 143. P. 147–158. 2017.
- Bronshten R.P. A magnetohydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs // Sol. Sys. Res. V. 17. P. 70–74. 1983.
- Bronshten V.A. Electrical and electromagnetic phenomena associated with the meteor flight // Sol. Sys. Res. V. 25. P. 93–104. 1991.
- Hoaglin D.C., Mosteller F., Tukey J.W. Understanding robust and exploratory data analysis. 2nd edition. New-York: John Wiley & Sons. 472 p. 2000.
- Keay C.S.L. Electrophonic sounds from large meteor fireballs // Meteoritics. V. 27. P. 144–148. 1992.
- Kerridge D. Intermagnet: worldwide near-real-time geomagnetic observatory data // Proc. Workshop on Space Weather, ESTEC. 2001.
- Popova O.P., Jenniskens P., Eme’yanenko V.V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. V. 342. P. 1069–1073. 2013.
- Price C., Blum M. ELF/VLF radiation produced by the 1999 Leonid meteors // Earth, Moon, Planets. V. 82/83. P. 545–554. 2000.
- Tietjen G.L., Moore R.H. Some Grubbs-type statistics for the detection of several outliers // Technometrics. V. 14. P. 583–597. 1972.