

УДК 552.6:550.38:551.510.535:551.594

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ПАДЕНИИ БОЛИДА НА ЗАПАДЕ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ 30.04.2024 г.

© 2024 г. А. А. Спивак\*, С. А. Рябова, А. В. Тихонова

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия**\*E-mail: spivak@idg.ras.ru*

Приведены данные инструментальных наблюдений за вариациями геомагнитного и электрического полей в приземной атмосфере в период пролета и взрывного разрушения болида 30.04.2024 г. на западной границе Белгородской области. С использованием данных, полученных в обсерваториях сети INTERMAGNET и геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН, показано, что разрушение болида, произошедшее в две стадии, сопровождалось вариациями магнитного поля на эпицентральных расстояниях до ~2000 км и вариацией напряженности электрического поля на расстоянии ~500 км. На основе результатов обработки ионограмм высотно-частотного зондирования ионосферы, полученных в Центре космических исследований Польской академии наук (г. Варшава), продемонстрирован ионосферный эффект рассматриваемого события в виде вариаций критической частоты  $f_0F2$  амплитудой ~0.4 МГц.

**Ключевые слова:** болид, магнитное поле, электрическое поле, критическая частота F2 слоя ионосферы, вариация.

**Для цитирования:** Спивак А.А., Рябова С.А., Тихонова А.В. Геофизические эффекты при падении болида на западе Белгородской области 30.04.2024 г. // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 2. С. 55–62. [http://doi.org/10.26006/29490995\\_2024\\_16\\_2\\_55](http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_2_55)

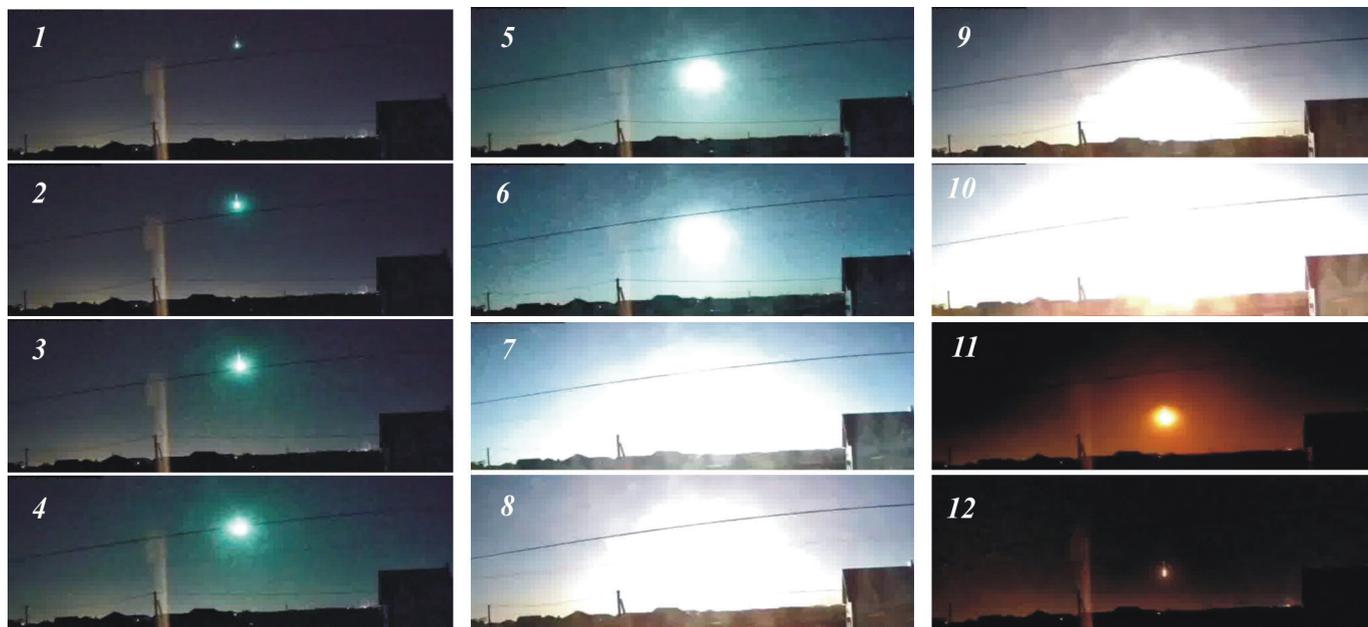
### Введение

Возможные негативные, а в ряде случаев опасные для человека и его деятельности, последствия падений на Землю космических тел определяют значительный интерес к инструментальному изучению геофизических эффектов, вызванных пролетом и достаточно часто наблюдаемыми взрывными разрушениями метеоритов (болиды) в атмосфере Земли [Астероидно... 2010; Катастрофические..., 2005; Binzel, 2000]. Указанные исследования, нацеленные в первую очередь на создание экспериментальной основы для разработки прогностических признаков возможной астероидной опасности, позволяют также существенно расширять наши представления о самом явлении и сопровождающих его процессах. Кроме того, это важно не только для верификации теоретических и численных моделей, разрабатываемых для описания реакции геосфер на сильное локальное возмущение [Адушкин, Спивак, 2014; Катастрофические..., 2005], но и для установления механизмов взаимодействия и преобразования физических полей в среде обитания.

Большинство известных исследований посвящено явлениям и процессам, происходящим в локальной области сильных возмущений, сопутствующих падению космических тел [Адушкин и др., 2004; Бернгард и др., 2013; Кузьмичева, Лосева, 2010; Кузьмичева и др., 2014; Рыбнов и др., 2014; Светцов и др., 2014; Черногор, 2009; 2018; Veech, Forschini, 1999; Bronshten, 1983 и др.]. При этом отмечается возможность генерации электромагнитного излучения, распространяющегося на значительные расстояния [Ковалева и др., 2014; Keay, 1992; Price, Blum, 2000]. Однако следует отметить, что имеющиеся на сегодняшний день данные весьма ограничены и довольно противоречивы. Это связано отчасти со сложностью явления, но, в первую очередь – с недостатком наблюдательных данных.

В настоящей работе рассматриваются геофизические эффекты, сопровождавшие пролет и взрывное разрушение болида 30 апреля 2024 г. По данным видеорегистрации (<https://bel.ru/news/2024-05-02/>

stalo-izvestno-kakoe-zagadochnoe-yavlenie-videli-belgorodtsy-nochyu-5071694) болид проявился в виде светящегося следа в атмосфере Земли ориентировочно в 22:15:15 UTC и наблюдался в течение ~ 6 с. Разрушение космического тела произошло над западной границей Белгородской области и сопровождалось двумя вспышками яркостью ~  $-15^m$  в 22:15:18.8 UTC и 22:15:19.7 UTC (рис. 1), что свидетельствует о двойной фрагментации болида.



**Рис. 1.** Кадры 1–12 пролета и взрывного разрушения болида (первичного – кадр 7 и вторичного – кадр 10), адаптированные с видеозаписи из <https://bel.ru/news/2024-05-02/stalo-izvestno-kakoe-zagadochnoe-yavlenie-videli-belgorodtsy-nochyu-5071694> (время между кадрами 0.3 с)

### Исходные данные

В качестве исходных данных использовались результаты инструментальных наблюдений в виде цифровых рядов, полученных при регистрации магнитного поля в ряде среднеширотных обсерваторий сети INTERMAGNET (табл. 1, рис. 2), геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН (МНВ)<sup>1</sup> и регистрации электрического поля в МНВ.

Компоненты<sup>2</sup> индукции магнитного поля  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$  измерялись в МНВ феррозондовым цифровым магнитометром LEMI-018, который обеспечивал регистрацию в диапазоне  $\pm 68000$  нТл с разрешением 10 пТл (частота выборки 1 с<sup>-1</sup>). Вертикальная компонента электрического поля  $E_z$  регистрировалась с помощью измерителя напряженности электрического поля BOLTEK EFM-100 в диапазоне частот 0–10 Гц.

В настоящей работе при анализе ионосферного эффекта привлекались в виде ионограмм результаты высотно-частотного зондирования, выполненного Центром космических исследований Польской академии наук (г. Варшава, ионозонд VISRC2), выложенные в открытом доступе (<http://www.rwc.cbk.waw.pl>). Технические характеристики ионозонда: мощность – 10 кВт, длительность импульса – 100 мс, период дискретизации – 5 мкс, разрешение по частоте – 25 Гц, аппаратное разделение обыкновенной и необыкновенной компонент. Зондирование выполнялось каждые 15 мин. Географические координаты ионозонда: 52.21° N, 21.06° E. Оценка критической частоты F2-слоя ионосферы  $f_0F2$  выполнялась путем ручной обработки ионограмм с интерпретацией по методике URSI [Руководство, 1977]. В результате формировался цифровой ряд данных временной вариации критической частоты F2-слоя  $f_0F2$  с дискретизацией 15 мин.

<sup>1</sup> Координаты магнитометрического павильона: 54.95° N; 37.76° E.

<sup>2</sup> Направление осей координат:  $x$  – С-Ю,  $y$  – В-З,  $z$  – вертикально вниз.

Таблица 1.

Данные по магнитным обсерваториям

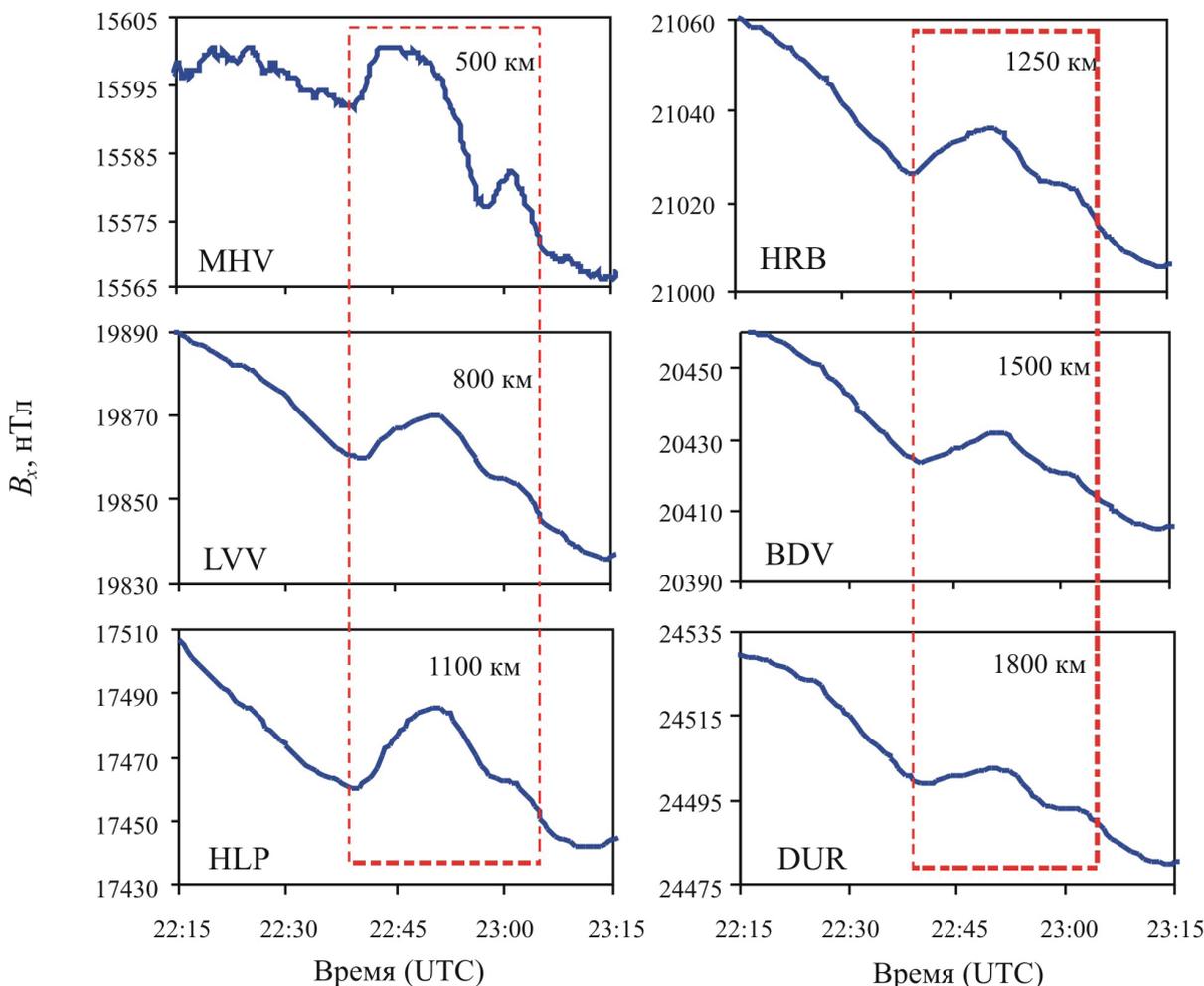
Код	GEO		R, км	B <sub>x</sub> <sup>*</sup> , нТл
	Широта	Долгота		
MHV	54.959° N	37.766° E	~ 500	~ 7.1
LVV	49.9° N	23.75° E	~ 800	~ 10.0
SUA	44.68° N	26.25° E	~ 900	~ 8.9
BEL	51.836° N	20.789° E	~ 1000	~ 16.1
HLP	54.6035° N	18.8107° E	~ 1100	~ 25.3
NUR	60.51° N	24.66° E	~ 1200	~ 15.5
PAG	42.515° N	24.177° E	~ 1250	~ 5.1
HRB	47.873° N	18.19° E	~ 1250	~ 9.9
GCK	44.633° N	20.767° E	~ 1300	~ 5.9
LON	45.4081° N	16.6592° E	~ 1500	~ 5.7
BDV	49.08° N	14.02° E	~ 1500	~ 6.9
PEG	38.1° N	23.9° E	~ 1700	~ 3.6
DUR	41.39° N	14.28° E	~ 1800	~ 3.8
BFO	48.331° N	8.325° E	~ 1900	~ 3.4



Рис. 2. Схема расположения обсерваторий сети INTERMAGNET (I – эпицентр взрыва болида (ориентировочно), II – станция высотно-частотного зондирования в г. Варшаве Центра космических исследований Польской академии наук (MZ152; ионозонд VISRC2))

### Геомагнитные вариации при пролете и разрушении болида

Анализ данных инструментальных наблюдений, выполненный в настоящей работе, свидетельствует о том, что падение и взрывы болида в атмосфере Земли 30.04.2024 г. сопровождались вариациями магнитного поля. В качестве примера на рис. 3 приведены вариации наиболее чувствительной к внешним воздействиям горизонтальной компоненты магнитного поля  $B_x$  в период рассматриваемого события по данным MHV и некоторых обсерваторий INTERMAGNET.



**Рис. 3.** Вариации горизонтальной компоненты  $B_x$  индукции геомагнитного поля в период падения и взрыва болида 30.04.2024 г. (пунктиром обозначен период вызванных вариаций)

Из графиков рис. 3 следует, что болид вызвал заметные изменения в суточном ходе индукции магнитного поля в период с  $\sim 22:40$  до  $\sim 23:05$  UTC 30.04.2024 г. При этом максимальная амплитуда вызванных болидом вариаций горизонтальной составляющей магнитного поля  $B^*$  заключена в интервале от  $\sim 3.4$  до  $\sim 25.3$  нТл в зависимости от расстояния (табл. 1). Характерно, что амплитуда вариаций в целом убывает с ростом эпицентрального расстояния  $R$  (рис. 4)<sup>3</sup>.

Для анализа оценок, приведенную на рис. 4 зависимость  $B^*(R)$ , допустимо представить в виде:

$$B^* \approx 37.13 \exp(-0.0012R) \text{ нТл},$$

где  $R$  выражено в км.

<sup>3</sup> Хорошо выраженное падение амплитуды с расстоянием  $R$  является достаточно весомым, хотя и косвенным доказательством того, что источником является рассматриваемый болид.

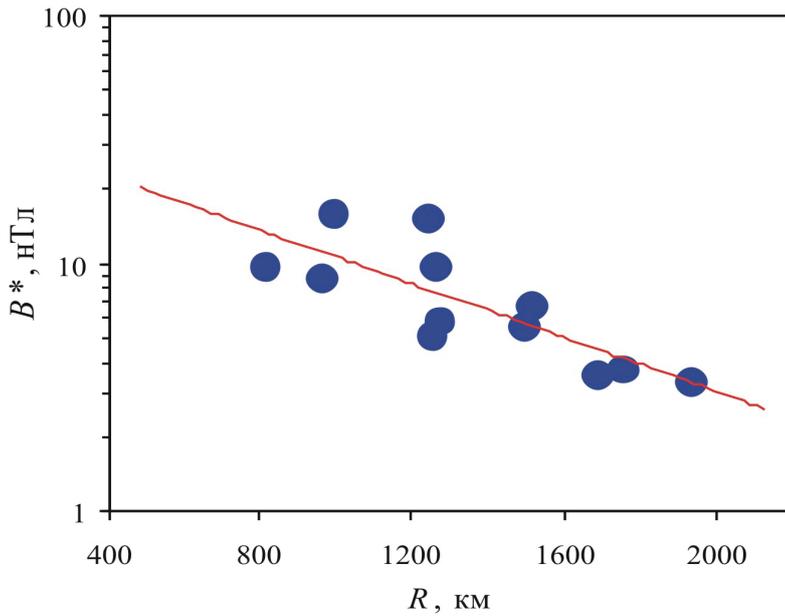


Рис. 4. Зависимость амплитуды, вызванных вариаций  $B^*$  от эпицентрального расстояния

### Вариации электрического поля

Наряду с магнитным эффектом болид вызвал вариации электрического поля. В распоряжении авторов имеются результаты регистрации вертикальной компоненты напряженности атмосферного электрического поля  $E_z$ , полученные в Геофизической обсерватории МНУ, расположенной примерно на расстоянии  $R \sim 500$  км от эпицентра взрывного разрушения болида. С целью более качественного выделения электрического эффекта в настоящей работе анализировалась величина  $E_z^*(t) = E_z(t) - E_0(t)$ , где  $E_0(t)$  – трендовая составляющая, вычисленная по результатам регистрации электрического поля за 26 магнитоспокойных дней, характеризующихся как дни с «хорошей погодой» (отсутствие грозных проявлений, осадков, тумана, инея, метели, кучевой облачности и ветра, скорость которого превышает 5 м/с) [Семенов, 1982; Izraelsson, 1978]. На рис. 5 приведен фрагмент записи  $E_z^*(t)$  в период вызванных вариаций электрического поля.

Данные рис. 5 свидетельствуют о том, что в период пролета и взрывного разрушения болида, несмотря на достаточно большое расстояние от эпицентра события, зарегистрировано возмущение атмосферного электрического поля в виде знакопеременных вариаций  $E_z^*$  амплитудой до  $\sim 17$  В/м. Наблюдаемый эффект допустимо рассматривать в качестве отклика на взрывное разрушение болида (полученные данные не противоречат известным результатам наблюдений при процессах взрывного типа в атмосфере [Адушкин и др., 2018]).

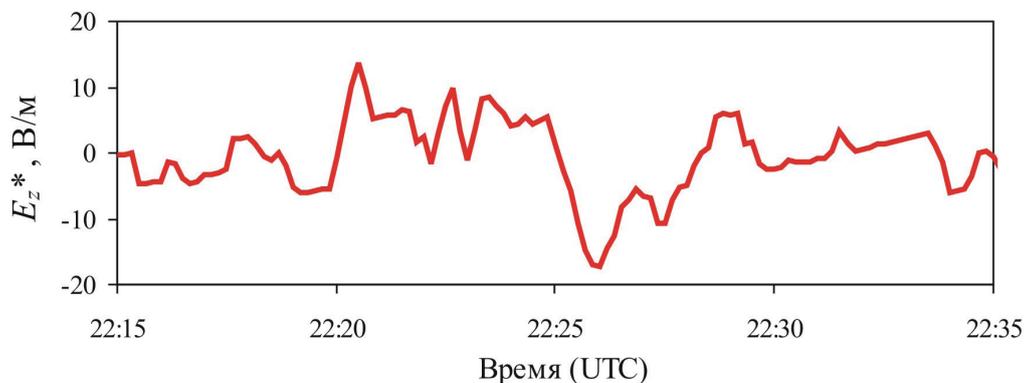


Рис. 5. Вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля за вычетом тренда в период пролета и взрывного разрушения болида 30.04.2024 г. (данные МНУ)

## Ионосферный эффект болида

Влияние космических тел на состояние ионосферы Земли представляет значительный интерес с точки зрения возможных изменений ее физических свойств, локально и в целом определяющих распространение радиоволн. При выполнении настоящих исследований нас заинтересовал вопрос, связанный с возможными изменениями критической частоты F2-слоя ионосферы  $f_0F2$ , напрямую характеризующими динамику состояния ионосферы, в частности, в условиях сильных внешних воздействий. С этой целью была выполнена обработка данных высотно-частотного зондирования, полученных Центром космических исследований Польской академии наук (код MZ152). Результаты обработки данных (приведены на рис. 6) показывают, что пролет и взрывное разрушение болида 30.04.2024 г. вызвали хорошо выраженные и достаточно продолжительные знакопеременные вариации критической частоты  $f_0F2$  с квазипериодом, примерно, от менее 30 мин до 45 мин и максимальной амплитудой около 0.4 МГц в период с ~ 22:45 UTC 30.04.2024 г. до ~ 01:15 UTC 01.05.2024 г. С большой вероятностью выявленные аномалии связаны с возмущениями, вызванными взрывным разрушением болида в атмосфере. Характерно, что скорость распространения возмущения от предполагаемого эпицентра взрыва болида до ионосферной станции в г. Варшаве составила примерно 1 км/с, – близко к скорости звука на высоте F-области ионосферы [Афраймович, Перевалова, 2006].

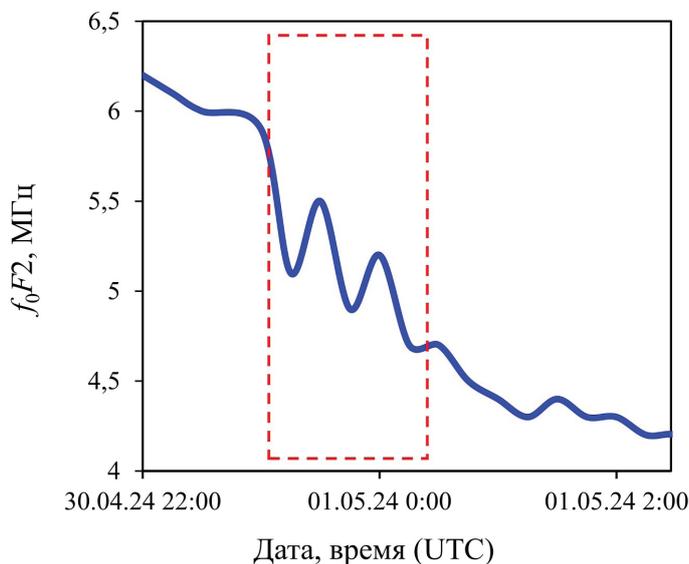


Рис. 6. Вариации критической частоты F2-слоя ионосферы  $f_0F2$ , вызванные пролетом и взрывным разрушением болида 30.04.2024 г.

## Заключение

Приведенные данные показывают, что пролету и взрывному разрушению болида 30.04.2024 г. сопутствовали хорошо выраженные эффекты в магнитном и электрическом полях, а также вариации критической частоты  $f_0F2$ . Результаты инструментальных наблюдений свидетельствуют о том, что пролет и взрывное разрушение рассматриваемого болида вызвали возмущение вертикальной компоненты напряженности в виде знакопеременных вариаций амплитудой до ~ 17 В/м на расстояниях до ~ 500 км. Магнитный эффект наблюдался до расстояний ~ 2000 км с амплитудой, достаточной для регистрации имеющимися средствами.

Возникающий вопрос об источниках и механизмах, вызывающих указанные эффекты, представляется авторам весьма важным и требует отдельного детального рассмотрения.

В любом случае полученные в настоящей работе результаты дополняют, по мнению авторов, существующие представления о геофизических последствиях сильных возмущений в атмосфере, вызванных космическими телами, и могут оказаться полезными при разработке и верификации аналитических и численных моделей, всесторонне описывающих сопутствующие им явления и процессы.

## Финансирование

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900185-5).

## 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. // Доклады академии наук. 2004. Т. 397. № 5. С. 685–688. <https://www.elibrary.ru/optwdb>
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. М. : ГЕОС, 2014. – 360 с.
- Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А. Электрические поля техногенных и природных процессов. М. : ГЕОС, 2018. – 464 с.
- Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 384 с.
- Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 479 с.
- Бернгард О.И., Добрынина А.А., Жеребцов Г.А., Михалев А.В., Первалова Н.П., Ратовский К.Г., Рахматуллин Р.А., Саньков В.А., Сорокин А.Г. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеорита // Доклады академии наук. 2013. Т. 452. № 2. С. 205–207. <https://doi.org/10.7868/S0869565213270157>
- Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. В.В. Адушкина и И.В. Немчинова. М. : ИКЦ «Академкнига», 2005. – 310 с.
- 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. М. : ГЕОС, 2014. С. 26–47. <https://www.elibrary.ru/tmzfdp>
- Кузьмичева М.Ю., Лосева Т.В. Оценка геомагнитного эффекта при Тунгусском событии 1908 г. // Динамические процессы в геосферах. М. : ГЕОС, 2010. С. 261–269.
- Кузьмичева М.Ю., Лосева Т.В., Ляхов А.Н. Ионосферный эффект Челябинского события // Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. М. : ГЕОС, 2014. С. 86–95. <https://www.elibrary.ru/tmzffd>
- 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, 2014. С. 78–85. <https://www.elibrary.ru/tmzfet>
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / Под редакцией П.В. Медниковой. М. : Наука, 1977. – 342 с.
- 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, 2014. С. 7–20. <https://www.elibrary.ru/rohbyz>
- Семенов К.А. Хорошая погода и элементы атмосферного электричества: Труды главной геофиз. обсерв. им. А.И. Воейкова. Вып. 455. Л. : Гидрометеиздат, 1982. С. 112–113.
- Черногор Л.Ф. Физические процессы, сопутствующие пролету Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Вестник астрономической школы. 2009. Т. 6. № 1. С. 30–43.
- Черногор Л.Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 2. С. 267–280. <https://doi.org/10.7868/S001679401802013X>
- Beech M., Foschini L.A. A space charge model for electrophonic busters // Astron. Astrophys. 1999. Vol. 345. P. L27–L31. <https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0112376>
- Binzel R.P. The Torino impact hazard scale // Planetary and Space Science. 2000. Vol. 48. P. 297–303. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(00\)00006-4](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(00)00006-4)
- Bronshten R.P. A magnetohydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs // Sol. Sys. Res. 1983. Vol. 17. P. 70–74.
- Izraelsson S. On the conception ‘Fair weather condition in atmospheric electricity’ // Pure Appl. Geophys. 1978. Vol. 16. P. 149–158. <https://doi.org/10.1007/BF00878989>
- Keay C.S.L. Electrophonic sounds from large meteor fireballs // Meteoritics. 1992. Vol. 27. P. 144–148. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1992.tb00741.x>
- Price C., Blum M. ELF/VLF radiation produced by the 1999 Leonid meteors // Earth, Moon, Planets. 2000. Vol. 82/83. P. 545–554. <https://doi.org/10.1023/A:1017033320782>

## GEOPHYSICAL EFFECTS OF A FALLING FIREBALL IN THE WEST OF THE BELGOROD REGION ON APRIL 30, 2024

© 2024 A. A. Spivak\*, S. A. Riabova, A. V. Tikhonova

*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

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

The data of instrumental observations of variations of the geomagnetic and electric fields in the surface atmosphere during the flight and explosive destruction of the fireball on April 30, 2024 on the western border of the Belgorod region are presented. Using data obtained at the observatories of the INTERMAGNET network and the Mikhnevo Geophysical Observatory of the IDG RAS, it was shown that the destruction of the bolide, which occurred in two stages, was accompanied by variations in the magnetic field at epicentral distances up to  $\sim 2000$  km and variations in the electric field strength at a distance of  $\sim 500$  km. Based on the results of processing ionograms of high-frequency ionospheric sounding obtained at the Space Research Center of the Polish Academy of Sciences (Warsaw), the ionospheric effect of the event in question was demonstrated in the form of variations of the critical frequency  $f_0F_2$  with an amplitude of  $\sim 0.4$  MHz.

**Keywords:** bolide, magnetic field, electric field, critical frequency F2 of the ionospheric layer, variation.