

УДК 528.2:550.341:550.24

АКУСТИЧЕСКИЙ И МАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТЫ ПАДЕНИЯ БОЛИДА 19.04.2023 г.

© 2023 г. Академик РАН В. В. Адушкин^{1,*}, Ю. С. Рыбнов^{1,**}, А. А. Спивак^{1,***}

Поступило 02.05.2023 г.

После доработки 05.05.2023 г.

Принято к публикации 06.05.2023 г.

Представлены результаты инструментальных наблюдений за акустическими колебаниями и геомагнитными вариациями в период падения болида 19.04.2023 г. в районе г. Киев (Украина). Показано, что взрыв болида сопровождался акустическим сигналом, зарегистрированным на значительном расстоянии от эпицентра события (~755 км), и проявился в вариациях магнитного поля. По данным акустических наблюдений зафиксировано 4 взрыва наиболее крупных фрагментов болида. Суммарная энергия события составила 4.2×10^{11} Дж, что соответствует примерно 0.1 кт в тротиловом эквиваленте. Максимальная амплитуда вызванных взрывом болида геомагнитных вариаций на расстояниях в диапазоне 454–909 км составила величину от 2.5 до 4 нТл.

Ключевые слова: болид, акустические колебания, магнитное поле, вариации

DOI: 10.31857/S2686739723600881, **EDN:** IMRATV

В настоящем сообщении рассматриваются геофизические эффекты в виде микробарических вариаций и вариаций магнитного поля Земли в период вхождения в атмосферу Земли болида, взрывное разрушение которого за время ~1 с произошло северо-западнее г. Киева 19.04.2023 г. в 18: 57 UTC (рис. 1).

По данным ИМО (International Meteor Organization) [1] болид был зафиксирован на высоте 98 км с траекторией в юго-западном направлении. Скорость болида приближалась к 29 км/с. Гелиоцентрическая орбита болида характеризовалась как астероидальная с наклоном к эклиптике ~46.5 градуса. Длина траектории болида в атмосфере Земли составила 132 км со средним наклоном к горизонтали ~32 градуса.

Согласно [1], пролет болида сопровождался в общей сложности 5 вспышками. Первая яркая вспышка с абсолютной яркостной магнитудой ~18, сопровождавшая взрыв космического тела, зафиксирована на высоте 38 км. За первой вспышкой последовали еще четыре меньших по магнитуде на высотах 32.5, 31, 30 и 29.5 км. В последний раз болид был замечен на высоте 28 км,

когда его скорость составляла около 10 км/сек. Судя по яркостной магнитуде первой эксплозии, болид относился к категории суперболидов с начальной массой несколько сотен килограмм, что соответствует размеру тела порядка метра.

Постоянный интерес к изучению эффектов, сопровождающих падение космических тел на Землю, определяется наряду с оценкой астероидной и кометной опасностью также необходимостью описания закономерностей распространения возмущений в атмосфере, вызванных сильными природными событиями [2, 3]. Большинство известных исследований связаны с описанием локальных, в основном оптических эффектов в области взрывного разрушения болидов [4–6]. Недостаток данных инструментальных наблюдений за другими геофизическими эффектами затрудняет разработку адекватных моделей, описывающих все стороны явления.

При описании геофизических последствий взрыва болида 19.04.2023 г. в качестве исходных в настоящей работе привлекались результаты инфразвуковых наблюдений, выполненных в Центре геофизического мониторинга Москвы ИДГ РАН (ЦГМ; GEO: 55.71° с.ш., 37.57° в.д.), а также данные магнитных наблюдений в активных обсерваториях сети INTERMAGNET, расположенных в эпицентральной области взрыва космического тела. Данные о магнитных обсерваториях и их расположение приведены соответственно в табл. 1 и на рис. 2.

¹Институт динамики геосфер
имени академика М.А. Садовского
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: adushkin@idg.ras.ru

**E-mail: rybnov.y@mail.ru

***E-mail: aaspivak100@gmail.com

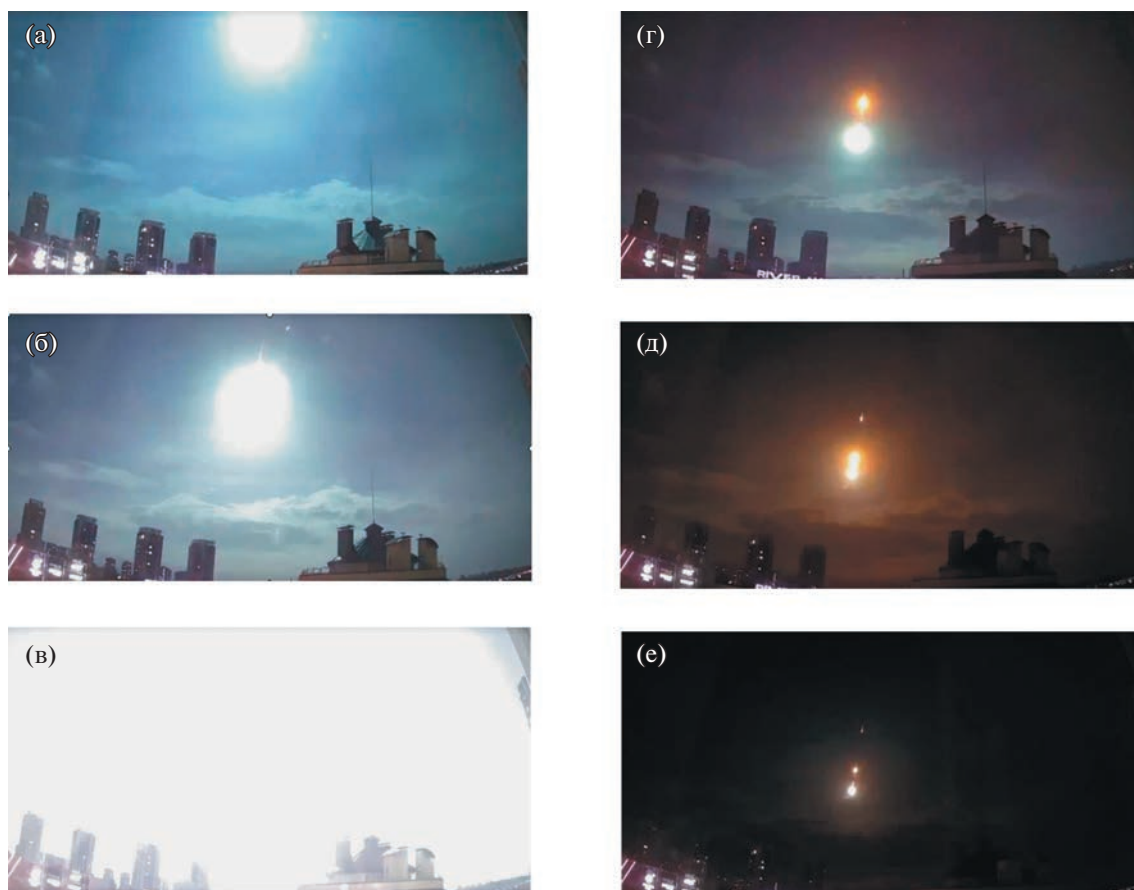


Рис. 1. Адаптированные кадры развития взрывной стадии болида 19.04.2023 г. из видеозаписи (https://tsargrad.tv/news/vspyshka-v-nebe-nad-kiyevom-nato-russkie-nlo-chto-izvestno-k-jetomu-chasu_767124) в разные моменты времени в интервале от 18 : 57 : 47 UTC (а) до 18 : 57 : 48 UTC (е). Кадры: (а)—(д) 5 вспышек болида, (е) заключительная стадия падения фрагментов космического тела.

Акустический эффект. Наблюдаемые инструментально микробарические вариации в приземной атмосфере связаны с ударной волной, вызванной взрывным разрушением болида [7, 8]. Волновые возмущения в атмосфере преимущественно в виде инфразвуковых волн, распространяющихся в атмосферном волноводе, регистрируются на значительных эпицентральных расстояниях R от места взрыва болида. Инфразвуковой сигнал, вызванный взрывом болида 19.04.2023 г. и зарегистрированный в ЦГМ на расстоянии $R \sim 755$ км, приведен на рис. 3. Приход сигнала в ЦГМ зарегистрирован в 19:43 UTC, что соответ-

ствует скорости распространения 274 м/с что характерно для акустических сигналов, распространяющихся в атмосферных волноводах [9].

Форма приведенная на рис. 3 записи свидетельствует о том, что суммарный сигнал длительностью 16.5 с состоит, по крайней мере, из 4 следующих друг за другом сигналов¹ с временной задержкой от 5 до 9 с. Эти сигналы с большой вероятностью соответствуют четырем наиболее сильным вспышкам, которые сопровождали взрывы четырех наиболее крупных фрагментов болида.

Задержка сигналов в этом случае объясняется тем, что взрывы болида и его фрагментов происходили на разных высотах [10]. Действительно, при распространении инфразвуковых сигналов в атмосферном волноводе со стратифицированной по высоте скоростью звука от источников, расположенных на разных высотах в диапазоне 20–40 км,

¹ Объявленный IMO пятый по счету взрыв фрагмента болида не проявился на записи инфразвукового сигнала в ЦГМ вследствие малой энергии источника.

Таблица 1. Данные по магнитным обсерваториям

Код	GEO		R , км	B^* , нТл
	Широта	Долгота		
LVV	49.9°с.ш.	23.75°в.д.	~450	~ -2.5
BEL	51.84°с.ш.	20.79°в.д.	~660	~ -4
HRB	54.60°с.ш.	18.81°в.д.	~900	~ -3.5

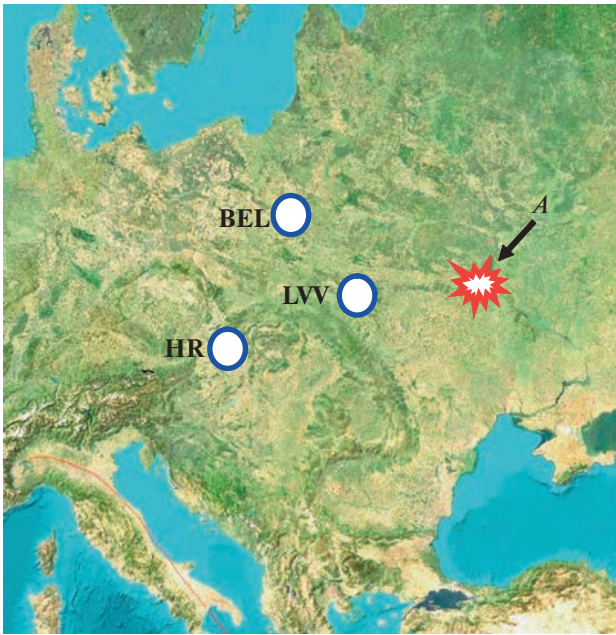


Рис. 2. Схема расположения эпицентра взрыва болида (А) и обсерваторий сети INTERMAGNET (коды обозначены в поле рисунка).

задержка по времени прихода сигналов в точку наблюдения на расстоянии ~ 755 км составляет ~ 4 – 10 с, что хорошо согласуется с результатами наблюдений.

Спектр суммарного зарегистрированного в ЦГМ сигнала приведен на рис. 4. Как это видно на рис. 4, в спектре наблюдаются 4 характерные частоты: 0.6, 1.0, 1.24 и 1.45 Гц. С учетом вышеизложенного, естественно полагать, что эти частоты соответствуют 4 сигналам, вызванным основным взрывом болида и последующими взрывами его фрагментов.

Наличие выделенных частот позволяет оценить суммарную энергию акустического источника Q с использованием подхода, предложенно-

го в работах [10, 11]. Метод основан на свойстве вызванного взрывом акустического сигнала сохранять значение преимущественной частоты f_0 при его распространении на значительные расстояния. При этом вычисление Q выполняется с использованием соотношения:

$$Q = \frac{8 \times 10^{10}}{f_0^{2.25}} \text{ Дж},$$

где f в Гц.

Вычисленные значения Q для каждого из взрывов рассматриваемого болида приведены ниже:

f_0 , Гц	0.6	1.0	1.24	1.45
Q , Дж	$\sim 2.52 \times 10^{11}$	$\sim 8 \times 10^{10}$	$\sim 4.93 \times 10^{10}$	$\sim 3.47 \times 10^{10}$

Общая энергия источника составила около 4.2×10^{11} Дж, что составляет примерно 0.1 кт в тротиловом эквиваленте.

Геомагнитный эффект. Результаты инструментальных наблюдений показывают, что падение и взрыв болида сопровождалось характерными вариациями магнитного поля. При этом необходимо отметить, что в период входа рассматриваемого космического тела в атмосферу Земли значения Kp -индекса магнитной активности не превышали 2, что значительно облегчило выделение вызванных болидом вариаций магнитного поля на фоне суточного хода. На рис. 5 приведена вариация наиболее чувствительной к внешним воздействиям горизонтальной компоненты магнитного поля V_x относительно тренда V^* в период взрывного разрушения болида по данным обсерваторий INTERMAGNET. Из графиков рис. 5 следует, что взрыв болида вызвал бухтообразное уменьшение V^* на всех рассмотренных эпицентральных расстояниях R в течение примерно 1 ч. При этом максимальная амплитуда вызванных взрывом болида вариаций горизонтальной составляющей магнитного поля заключена в узком

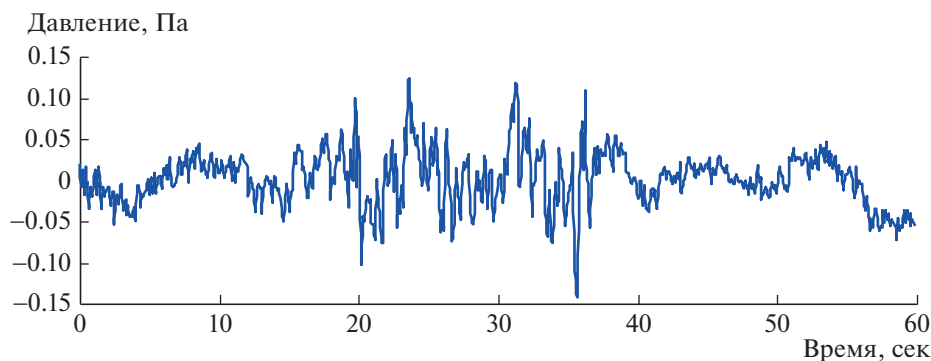


Рис. 3. Инфразвуковой сигнал от взрыва болида 19.04.2023 г. в частотном диапазоне 0.1–5 Гц, зарегистрированный в ЦГМ на расстоянии ~ 755 км (начало записи в 19: 43 UTC).

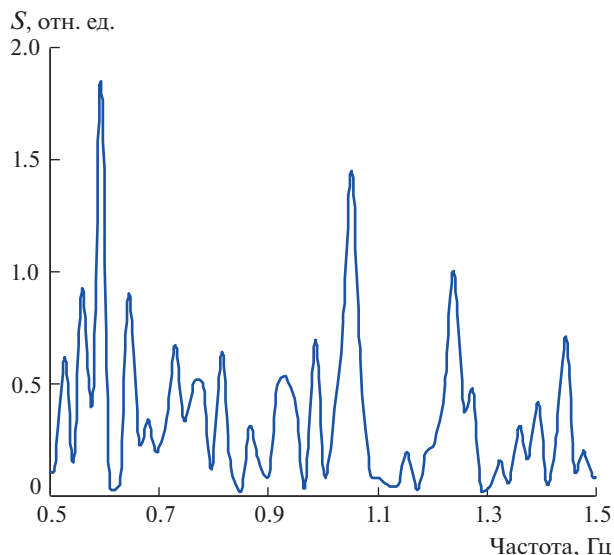


Рис. 4. Спектр S инфразвукового сигнала, приведенного на рис. 3.

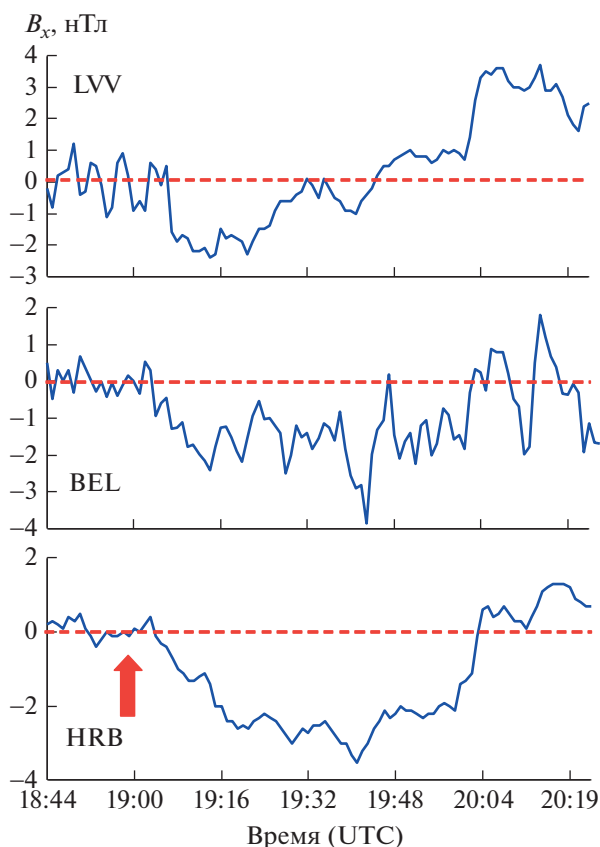


Рис. 5. Вариации горизонтальной компоненты магнитного поля относительно тренда B^* в период взрывного разрушения болида на разных эпицентральных расстояниях; код обсерватории INTERMAGNET и значения R приведены в поле рисунков (красной стрелкой обозначено время взрыва болида).

интервале: от ~ 2.5 до ~ 4 нТл (табл. 1). Характерно, что вызванные вариации наблюдаются во всех обсерваториях примерно в одно и то же время $\sim 19:05$ UTC, близкое ко времени взрыва болида.

В целом можно констатировать, что взрывное разрушение болида 19.04.2023 г. вызвало не только волновые возмущения в атмосфере, которые в виде инфразвукового сигнала зарегистрированы на расстоянии ~ 755 км от эпицентра источника, но также значимые по амплитуде геомагнитные вариации в приземной атмосфере.

Вопрос о механизмах, вызывающих геомагнитные вариации в период взрывных разрушений космических объектов, в настоящее время окончательно не решен. Вероятнее всего возмущение магнитного поля вызывается в этом случае акустическим воздействием на ионосферу Земли в эпицентральной зоне события [13].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 122032900185-5 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.imo.net/april-19-superbolide-over-ukraine/>
2. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2010. 384 с.
3. Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. В.В. Адушкина и И.В. Немчинова. М.: ИКЦ “Академкнига”. 310 с. 2005.
4. Адушкин В.В., Попова О.П., Рыбнов Ю.С., Кудряцев В.И., Мальцев А.Л., Харламов В.А. Геофизические эффекты Витимского болида 24.09.2022 г. // ДАН. Т. 397. № 5. С. 685–688. 2004.
5. 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 // ДАН. 2013. Т. 452. № 2. С. 205–207.
6. Beech M., Foschini L.A. A space charge model for electrophonic busters // Astron. Astrophys. 1999. V. 345. L27–L31.
7. 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. 1994. P. 721–778.
8. Edwards W.N. Meteor generated infrasound: theory and observation / In: Infrasonic Monitoring for Atmosph. Stud. Springer, Dordrech. 2010. P. 361–414.
9. Куличков С.Н., Авилов К.В., Буш Г.А., Попов О.Е. и др. Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взры-

- вов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 3–12.
10. Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Инфразвук в атмосфере. М.: ТОРУС ПРЕСС. 2020. 332 с.
11. Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Оценка энергии источников инфразвукового возмущения в атмосфере по спектру волновых форм // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2019. С. 416–426.
12. Адушкин В.В., Спивак А.А. Воздействие экстремальных природных событий на геофизические поля в среде обитания // Физика Земли. 2021. № 5. С. 6–16.

ACAUSTIC AND MAGNETIC EFFECTS OF THE BOLIDE FALL ON 04/19/2023

Academician of the RAS V. V. Adushkin^{a,#}, Yu. S. Rybnov^{a,##}, and A. A. Spivak^{a,###}

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: adushkin@idg.ras.ru*

^{##}*E-mail: rybnov.y@mail.ru*

^{###}*E-mail: aaspivak100@gmail.com*

The results of instrumental observations of acoustic oscillations and geomagnetic variations during the fall of the bolide on 04/19/2023 in the area of Kiev (Ukraine) are presented. It is shown that the explosion of the car was accompanied by an acoustic signal recorded at a considerable distance from the epicenter of the event (~755 km), and manifested itself in variations of the magnetic field. According to acoustic observations, 4 explosions of the largest fragments of the car were recorded. The total energy of the event was 4.2–10¹¹ J, which corresponds to about 0.1 kt in TNT equivalent. The maximum amplitude of geomagnetic variations caused by the explosion of the bolide at distances in the range of 454–909 km was from 2.5 to 4 Nt.

Keywords: fireball, acoustic oscillations, magnetic field, variations