

УДК 528.2:550.341:550.24

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ВЫЗВАННЫЕ ПАДЕНИЕМ БОЛИДА 02.09.2023 Г. (ТУРЦИЯ)

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

Представлено академиком РАН В.В. Адушкиным 08.12.2023 г.

Поступило 08.12.2023 г.

После доработки 20.12.2023 г.

Принято к публикации 29.12.2023 г.

Представлены результаты инструментальных наблюдений за акустическими колебаниями, геомагнитными вариациями и вариациями атмосферного электрического поля в период падения и взрывного разрушения болида на юго-востоке Турции 02.09.2023 г. Показано, что разрушение болида под действием аэродинамических сил, произошедшее в три стадии, сопровождалось акустическим сигналом характерной формы и проявилось в вариациях магнитного и электрического поля в приповерхностном слое атмосферы. Суммарная энергия события, оцененная по акустическому эффекту, составила $\sim 9 \times 10^{12}$ Дж, что соответствует примерно 2.15 кт в тротиловом эквиваленте. Максимальная амплитуда вызванных взрывом болида геомагнитных вариаций составила величину от 0.2 до 2.1 нТл в зависимости от расстояния. При этом амплитуда вариаций вертикальной компоненты атмосферного электрического поля в ГФО “Михнево” (расстояние ~ 1900 км) составила ~ 40 В/м. Продемонстрирован ионосферный эффект рассматриваемого события в виде вариаций критической частоты f_0F_2 , полученных в результате обработки ионограмм высотно-частотного зондирования ионосферы на станции “Рим”.

Ключевые слова: болид, акустические колебания, магнитное поле, электрическое поле, критическая частота F2-слоя ионосферы, вариации

DOI: 10.31857/S2686739724040126

Падение метеороидов [1] на Землю сопровождается рядом атмосферных эффектов, в первую очередь в виде образования светящегося следа, вызванного воспламенением и горением космического тела, световых импульсов (вспышек) в случае взрывного разрушения тела в результате его нагрева, а также ударной волны, которая преобразуется с расстоянием в акустическую, в частности, инфразвуковую [2]. Наряду с оптическими и акустическими эффектами падение метеороидов сопровождается возмущением геофизических полей — магнитного и электрического [3, 4]. Изучение геофизических эффектов метеороидов, особенно в виде болидов, представляет особый интерес не только с точки зрения обеспечения постоянной бесперебойной радиосвязи, но также в целях описания закономерностей формирования и распространения

возмущений в атмосфере, вызванных сильными природными событиями.

В настоящем сообщении рассматриваются геофизические эффекты, вызванные пролетом и взрывным разрушением болида 02 сентября 2023 г. По данным видеорегистрации [5], болид проявился в виде светящегося следа в атмосфере Земли ориентировочно сразу после 17:00 UTC и наблюдался в течение ~ 5 с. Основное разрушение космического тела произошло над юго-восточной окраиной Турции (примерно над г. Малатья). Согласно имеющимся видеозаписям (рис. 1), пролет сопровождался тремя хорошо выраженными вспышками, которые, вероятнее всего, связаны с разрушением основного космического тела, а затем его двух наиболее крупных осколков. В литературе приводится описание, как правило, локальных, в основном оптических эффектов в области взрывного разрушения болидов [7–9]. Вместе с тем имеется недостаток данных инструментальных наблюдений за вызванными вариациями геофизических полей, которые востребованы при разработке

Институт динамики геосфер имени академика
М.А. Садовского Российской Академии наук, Москва, Россия
*E-mail: aaspivak100@gmail.com
**E-mail: riabovasa@mail.ru

адекватных моделей, описывающих все стороны явления.

Для описания геофизических эффектов взрыва болида 02.09.2023 г. в качестве исходных в настоящей работе привлекались данные инструментальных наблюдений за микробарическими вариациями в атмосфере, выполненных в Центре геофизического мониторинга Москвы ИДГ РАН (ЦГМ; GEO: 55.71°с.ш.; 37.57°в.д.), результаты регистрации геомагнитных вариаций и вариаций атмосферного электрического поля, выполненных в Геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН (МНВ; GEO: 54.96°с.ш.; 37.76°в.д.), а также результаты магнитных измерений, выполненных в ряде активно действующих в этот период обсерваторий сети INTERMAGNET (табл. 1, рис. 2).

С целью описания отклика ионосферы на падение болида выполнялась оценка критической частоты F2-слоя на основе анализа ионограмм, полученных в ходе высотно-частотного зондирования ионосферы на станции “Рим” (GEO ионозонда: 41.8°с.ш.; 12.5°в.д.)¹. Ионограммы и результаты их первичной автоматической обработки размещены в открытом доступе на сайте Национального института геофизики и вулканологии Италии [10].

Взрывное разрушение болида в атмосфере Земли под действием аэродинамических сил вызывает ударную волну, которая, распространяясь и ослабляясь, вызывает в свою очередь микробарические вариации в приземной атмосфере [12]. Связанные с ними волновые возмущения, проявляющиеся преимущественно в виде инфразвуковых волн, распространяются в атмосферном волноводе и регистрируются на значительных эпицентральных расстояниях R от места взрыва болида [13].

На рис. 3 приведен инфразвуковой сигнал, вызванный взрывом болида 02.09.2023 г. и зарегистрированный в ЦГМ на расстоянии $R \sim 1900$ км. Приход инфразвукового сигнала в ЦГМ зарегистрирован в $\sim 19:07$ UTC, что соответствует скорости распространения ~ 263 м/с — величины, характерной для акустических сигналов, распространяющихся в атмосферных волноводах [14]. Следует отметить, что инфразвуковой сигнал отражает в данном случае суперпозицию трех сигналов от трех взрывов, произошедших на разных высотах, и которые вследствие этого распространялись, что в данном случае важно, по разным траекториям [15].

¹ Ионограммы подвергались ручной обработке и интерпретации по методике URSI [11].

Таблица 1. Данные по магнитным обсерваториям

Код	GEO		R , км	B^* , нТл
	Широта	Долгота		
SUA	44.68° N	26.25° E	~ 1300	~ 1.1
PEG	38.1° N	23.9° E	~ 1330	~ 0.3
PAG	42.515° N	24.177° E	~ 1360	~ 0.4
GCK	44.633° N	20.767° E	~ 1690	~ 0.7
MHV	54.959° N	37.766° E	~ 1900	~ 2.1
HRB	47.873° N	18.19° E	~ 2020	~ 0.7
LON	45.4081° N	16.6592° E	~ 2030	~ 0.6
BEL	51.836° N	20.789° E	~ 2100	~ 1.5
DUR	41.39° N	14.28° E	~ 2150	~ 0.6
FUR	48.17° N	11.28° E	~ 2510	~ 0.6
NGK	52.07° N	12.68° E	~ 2580	~ 1.3
WNG	53.725° N	9.053° E	~ 2870	~ 2
TAM	22.79° N	5.53° E	~ 3610	~ 0.5
HAD	51° N	4.48° W	~ 3680	~ 0.2
SPT	39.55° N	4.35° W	~ 3730	~ 0.3
GUI	28.321° N	16.441° W	~ 5200	~ 0.3

Таблица 2. Значения энергии взрывного разрушения болида

f_0 , Гц	0.723	0.72	0.714
Q , Дж	$\sim 3.04 \times 10^{12}$	$\sim 3.02 \times 10^{12}$	$\sim 3 \times 10^{12}$

Зависимость спектральной плотности S от частоты инфразвукового сигнала, вызванного взрывами болида, приведена на рис. 4. На приведенном графике ярко выделяются три максимума со значениями пиковых частот $f_1 = 0.1986$, $f_2 = 0.199$ и $f_3 = 0.1997$ Гц. Наличие характерных частот, соответствующих, вероятнее всего, трем стадиям взрывного разрушения болида (кадры 4, 9 и 12), позволяет оценить энергию каждого из взрывов. С этой целью в настоящей работе использовался метод оценки энергии расположенного в атмосфере взрывного источника, основанный на постоянстве характерной частоты f_0 вызванного инфразвукового сигнала при его распространении на значительные расстояния [16]. Вычисления энергии Q выполняется с использованием соотношения:

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

где f_0 выражена в Гц.

Значения Q для каждого из трех взрывов рассматриваемого болида приведены в табл. 2. При этом с учетом размера вспышек и их яркости предполагается, что, несмотря на близость значений Q ,

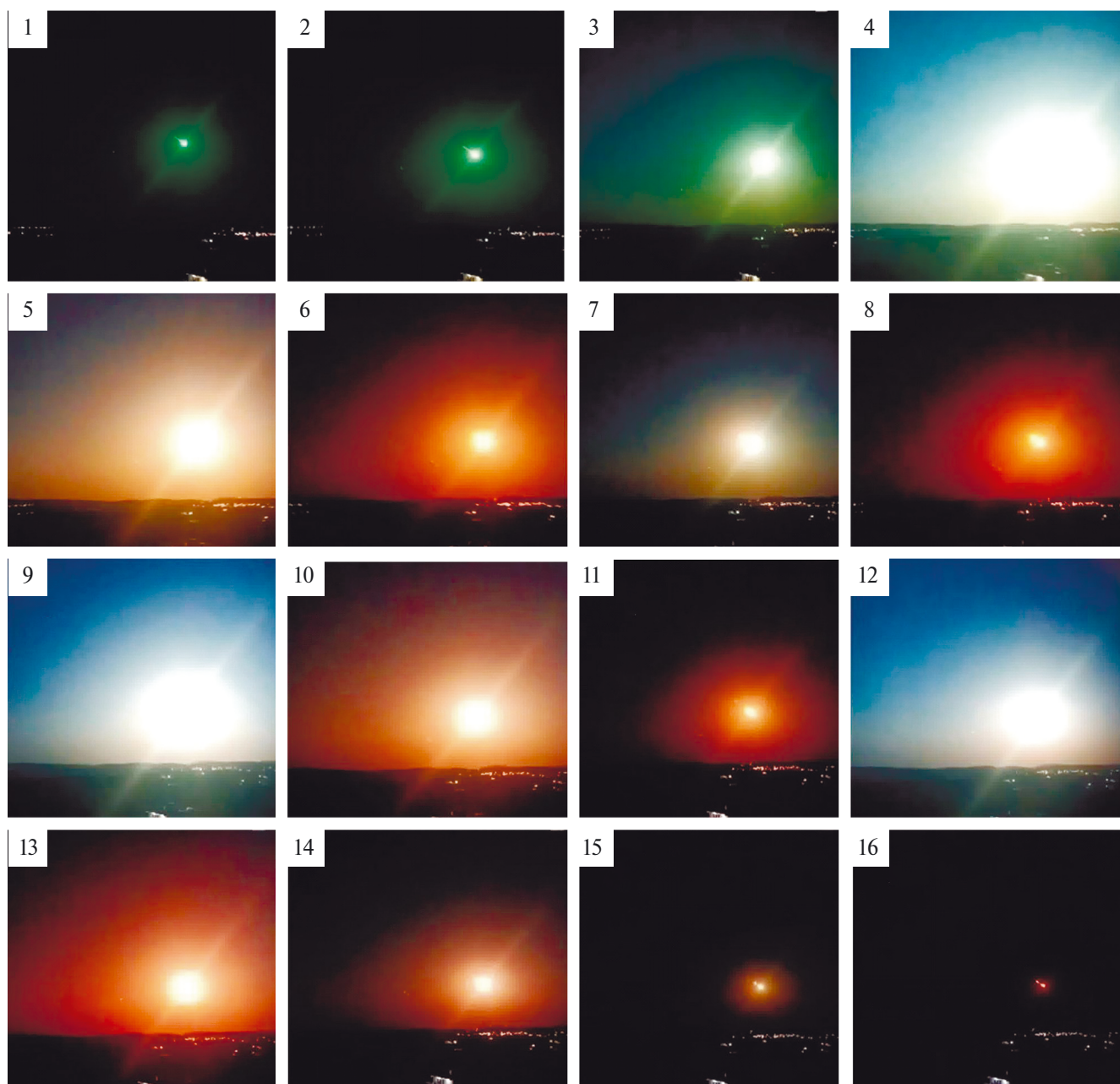


Рис. 1. Кадры пролета (1–16) и взрывного разрушения болида (4) и его фрагментов (9, 12), адаптированные с видеозаписи из <https://smotrim.ru/article/353161> (время между кадрами 0.25 с).

наибольшее выделение энергии происходит при первом взрыве, минимальное при третьем.

Общая энергия источника составила около 9×10^{12} Дж, что составляет примерно 2.15 кт в тротиловом эквиваленте.

Падение и взрывы болида 02.09.2023 г. сопровождалось вариациями магнитного поля в области размером до ~ 4000 км. На рис. 5 приведены примеры вариаций наиболее чувствительной к внешним воздействиям горизонтальной

компоненты магнитного поля B_x в период взрывного разрушения болида по данным обсерваторий INTERMAGNET. Из графиков рис. 5 следует, что взрыв болида вызвал заметное бухтообразное уменьшение B_x на всех рассмотренных эпицентральных расстояниях R в течение примерно 5 минут. При этом максимальная амплитуда вызванных взрывом болида вариаций горизонтальной составляющей магнитного поля, несмотря на большое различие в расстояниях, заключена в достаточно узком интервале:



Рис. 2. Схема расположения обсерваторий сети INTERMAGNET (кружки) и ионосферной станции “Рим” (треугольник); *I* – место падения болида, *II* – расположение станции “Рим”.

от ~ 0.2 до ~ 2.1 нТл (табл. 1). Наблюдаемая картина качественно и количественно согласуется с известными данными, полученными при регистрации взрывов в атмосфере [3, 17].

Наряду с магнитным эффектом взрывное разрушение болида сопровождалось вариациями электрического поля. На рис. 6 приведены вариации вертикальной компоненты напряженности атмосферного электрического поля E , зарегистрированные в MHV. Из рис. 6 следует, что, несмотря на значительное расстояние R , зарегистрирован электрический эффект в виде знакопеременных вариаций E повышенной

амплитуды в период с $\sim 17:15$ до $17:26$ UTC, что в данном случае допустимо рассматривать в качестве отклика на взрывное разрушение болида (полученные данные не противоречат известным результатам наблюдений при процессах взрывного типа в атмосфере [18]). Максимальная амплитуда вариаций, характеризующихся периодом около 3 мин, составила около 40 В/м за вычетом тренда.

Здесь следует отметить, что вопрос о механизмах генерации магнитного и электрического сигналов при падении и взрывах болида

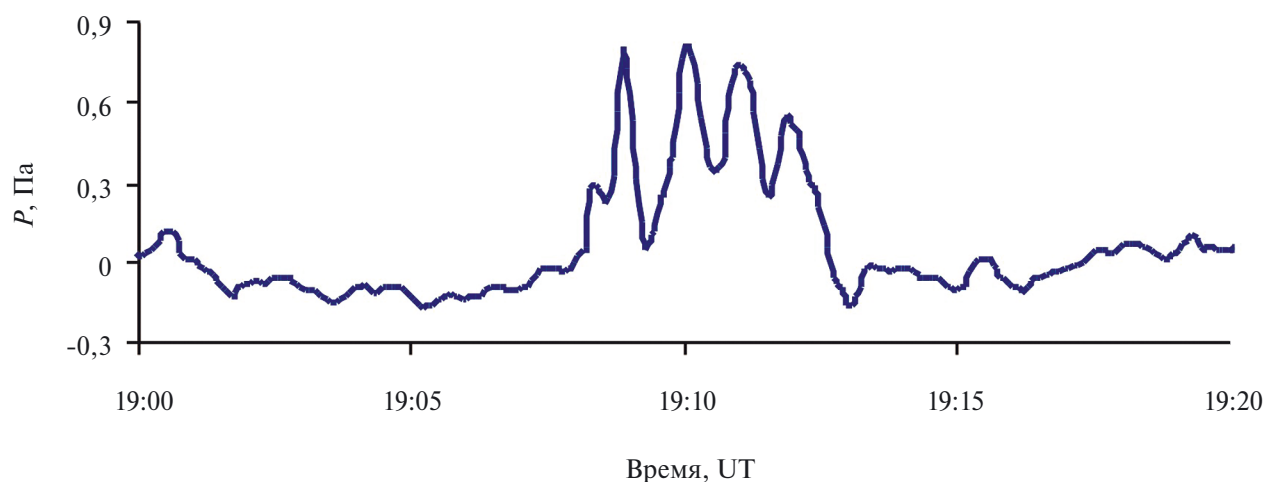


Рис. 3. Инфразвуковой сигнал от взрыва болида 02.09.2023 г. в частотном диапазоне 0.1–5 Гц, зарегистрированный в ЦГМ на расстоянии ~1900 км.

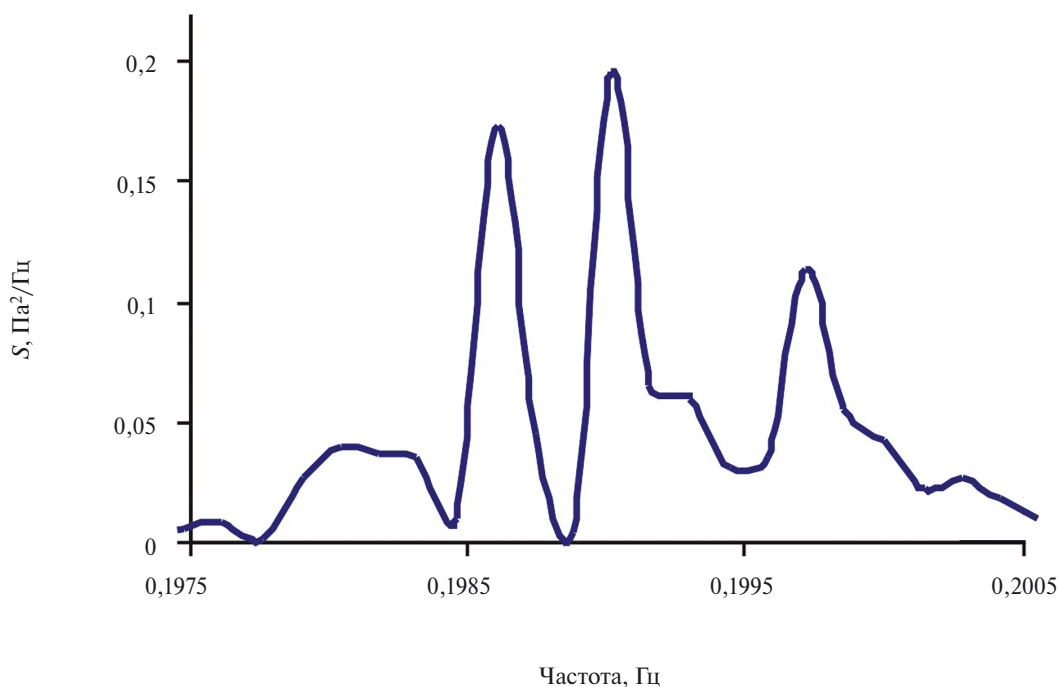


Рис. 4. Спектр S инфразвукового сигнала, приведенного на рис. 3.

представляется весьма важным и требует отдельного детального обсуждения.

Отклик ионосферы на рассматриваемое событие был представлен изменением во временном ходе критической частоты F2-слоя f_0F2 . Результаты обработки ионограмм по пятиминутным интервалам приведены на рис. 7 в виде зависимости f_0F2 от времени. Из рис. 7 видно, что взрывное разрушение болида вызвало

хорошо выраженные знакопеременные вариации f_0F2 амплитудой до 0.3 МГц.

В заключение можно констатировать, что результаты инструментальных наблюдений свидетельствуют о том, что взрывное разрушение болида вызвало не только акустические возмущения в атмосфере, но также геомагнитные вариации и вариации электрического поля в приземной атмосфере на значительных эпицентральных расстояниях. Одновременно с этим

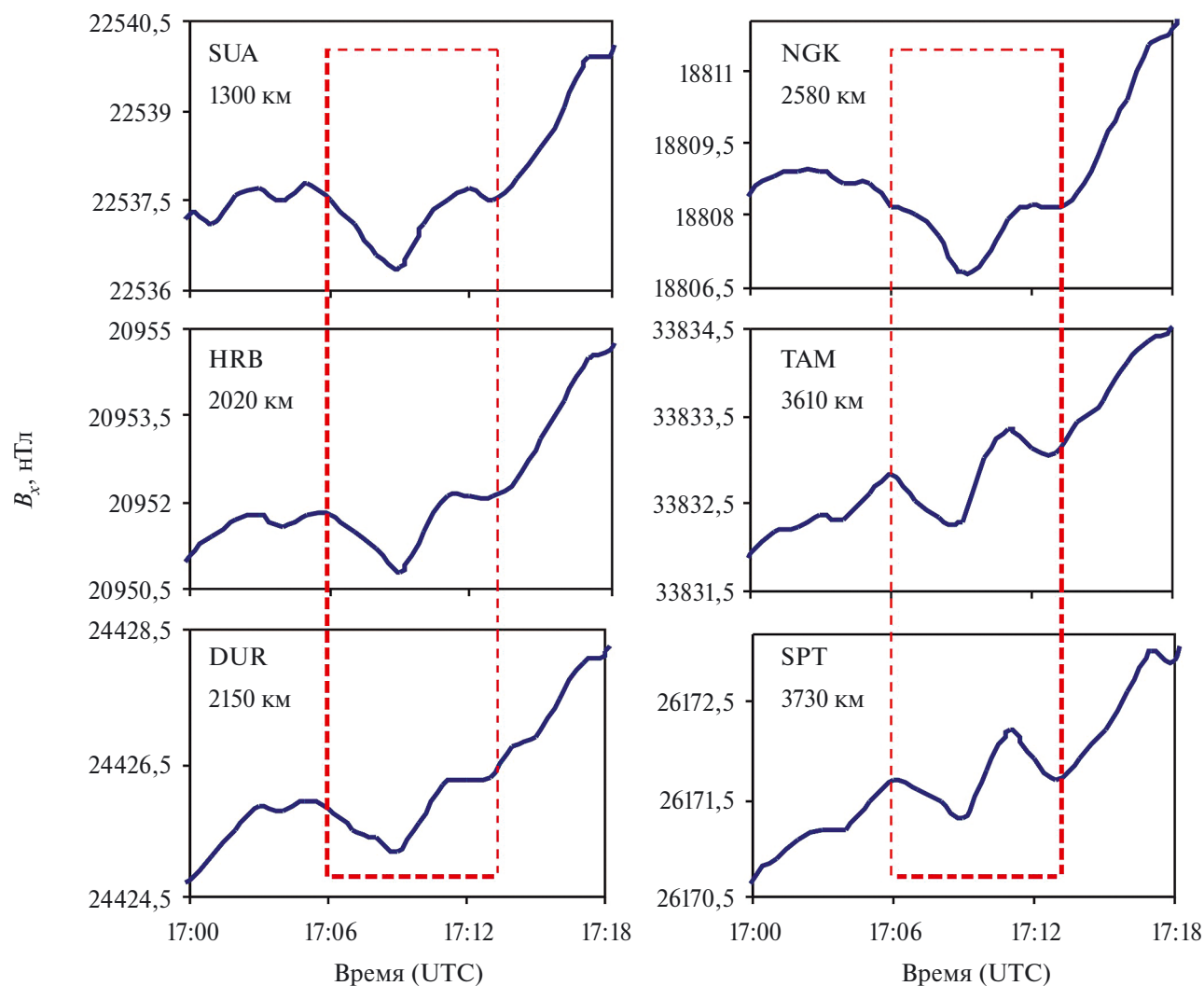


Рис. 5. Вариации горизонтальной компоненты магнитного поля B_x в период взрывного разрушения болида на разных эпицентральных расстояниях; код обсерватории INTERMAGNET и значения R приведены в поле рисунков (пунктиром выделен период вызванных вариаций).

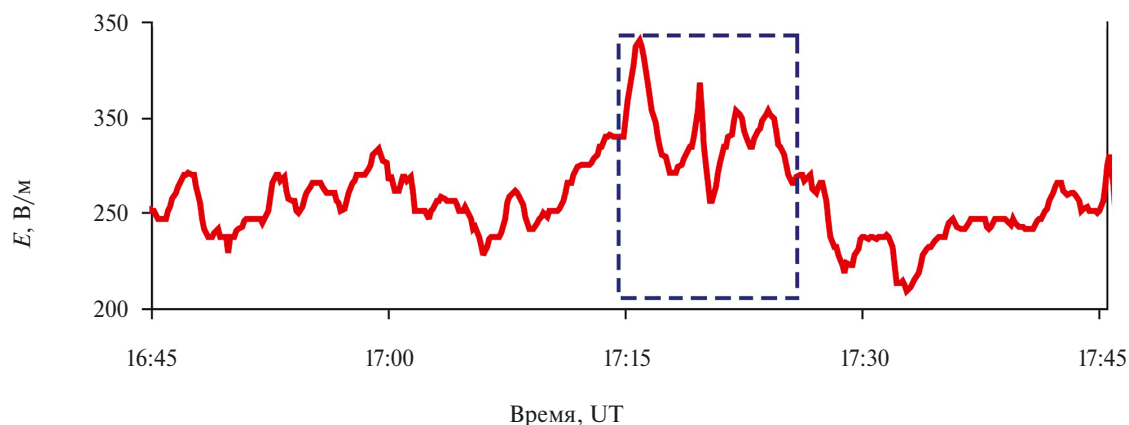


Рис. 6. Вариации вертикальной компоненты электрического поля в приземной атмосфере E по данным MНV (пунктиром выделен период вызванных вариаций).

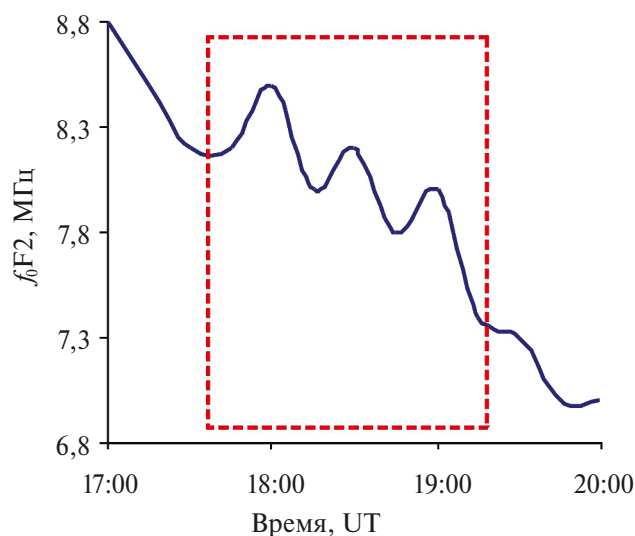


Рис. 7. Вариации критической частоты ионосферы, вызванные взрывным разрушением болида 02.09.2023 г. (пунктиром выделен период вызванных вариаций).

отмечаются значимые по амплитуде вариации критической частоты F2-слоя ионосферы.

По мнению авторов, приведенные данные могут представлять интерес при разработке и верификации концептуальных, феноменологических и расчетных моделей, описывающих последствия вхождения космических тел в атмосферу Земли.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robin A.E., Grossman J.N. Meteorite and meteoroid: new comprehensive definitions // *Meteorites & Planetary Science*. 2010. V. 45. № 1. P. 114–122.
2. Катастрофические воздействия космических тел. Под ред. В.В. Адушкина и И.В. Немчинова. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2005. 310 с.
3. Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов. М.: ГЕОС, 2021. 264 с.
4. Rybnov Yu.S., Riabova S.A., Romanovsky Ya.O., Spivak A.A. Atmospheric effects caused by the fall of the Izhevsk bolide on November 17, 2021 / 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2022. DOI: 10.1117/12.2643673.
5. <https://time/astrolert/5309>
6. <https://smotrim.ru/article/3531619>
7. Адушкин В.В., Попова О.П., Рыбнов Ю.С., Кудрявцев В.И., Мальцев А.Л., Харламов В.А. Геофизические эффекты Витимского болида 24.09.2002 г. // *ДАН*. 2004. Т. 397. № 5. С. 685–688.
8. 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.
9. Beech M., Foschini L.A. A space charge model for electrophonic busters // *Astronomy and Astrophysics*. 1999. V. 345. P. L27–L31.
10. <http://www.ct.ingv.it/>
11. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Под редакцией П.В. Медниковой. М.: Наука, 1977. 342 с.
12. Edwards W.N. Meteor generated infrasound: theory and observation / In: *Infrasound Monitoring for Atmosph. Stud.* Springer, Dordrech. 2010. P. 361–414.
13. Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Инфразвук в атмосфере. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2020. 332 с.
14. Куличков С.Н., Авилов К.В., Буш Г.А., Попов О.Е. и др. Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2004. Т. 40. № 1. С. 3–12.
15. Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Акустический и магнитный эффекты падения болида 19.04.2023 г. // *Доклады академии наук. Науки о Земле*. 2023. Т. 512. № 1. С. 122–126.
16. Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. О связи параметров инфразвуковых волн с энергией источника // *Физика Земли*. 2019. № 6. С. 96–106.
17. Глухов А.Г., Горбачев Л.П., Котов Ю.Б. и др. Параметры геомагнитных возмущений, генерация и распространение ЭМИ / *Физика ядерного взрыва: В 5 т. Том 5. Контроль ядерных испытаний*. Министерство обороны Российской Федерации. Российская академия артиллерийских наук. 12 Центральный научно-исследовательский институт. М.: Физматлит. Сергиев Посад, ВДВ, 2020. С. 437–463.
18. Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А. Электрические поля техногенных и природных процессов. М.: ГЕОС, 2018. 464 с.

GEOPHYSICAL EFFECTS CAUSED BY THE BOLIDE FALL ON SEPTEMBER 02, 2023 (TURKEY)

A. A. Spivak[#], Yu. S. Rybnov, S. A. Riabova^{##}, A. V. Tikhonova

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin December 08, 2023

Received December 08, 2023

After revision December 20, 2023

Accepted December 29, 2023

Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#]*E-mail: aaspivak100@gmail.com*

^{##}*E-mail: riabovasa@gmail.ru*

We present the results of instrumental observations of acoustic oscillations, geomagnetic variations and variations of the atmospheric electric field during the fall and explosive destruction of the bolide in the southeast of Turkey on September 02, 2023. It is shown that the destruction of the bolide under the action of aerodynamic forces, which occurred in three stages, was accompanied by an acoustic signal of a characteristic shape and manifested in variations of the magnetic and electric fields in the near-surface layer atmosphere. The total energy of the event, estimated by the acoustic effect, was $\sim 9 \times 10^{12}$ J, which corresponds to about 2.15 kt in TNT equivalent. The maximum amplitude of geomagnetic variations caused by the explosion of the bolide ranged from 0.2 to 2.1 nT depending on the distance. At the same time, the amplitude of variations of the vertical component of the atmospheric electric field at the Mikhnevo observatory (distance ~ 1900 km) was ~ 70 V/m. The ionospheric effect of the event under consideration is demonstrated in the form of variations of the critical frequency f_0F2 obtained as a result of processing ionograms of height-frequency sounding of the ionosphere at the Rome station.

Keywords: bolide, acoustic vibrations, magnetic field, electric field, critical frequency of the F2 ionosphere layer, variations