

УДК 528.2:550.341:550.24

АКУСТИЧЕСКИЙ И МАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ ПАДЕНИЯ БОЛИДА 17.11.2021 г.

© 2022 г. Ю. С. Рыбнов^{1,*}, С. А. Рябова^{1,**}, А. А. Спивак^{1,***}

Представлено академиком РАН В.В. Адушкиным 25.02.2022 г.

Поступило 25.02.2022 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принято к публикации 01.03.2022 г.

Приведены результаты инструментальных наблюдений за акустическими колебаниями и геомагнитными вариациями в период падения болида 17.11.2021 г. в районе г. Ижевск (Россия). Показано, что взрыв болида сопровождался акустическим сигналом и проявился в вариациях магнитного поля. По данным акустических наблюдений, выполненных в трех пунктах, определен вероятный район разрушения болида и оценена энергия акустического источника. Отмечается, что геомагнитный эффект, вызванный взрывом болида, имеет нелокальный характер и наблюдается на эпицентральных расстояниях до ~4000 км.

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

DOI: 10.31857/S2686739722060135

Постоянный интерес к изучению эффектов, сопровождающих падение космических тел на Землю, определяется наряду с оценкой астероидной и кометной опасности также возможностью рассмотрения вопросов, связанных с закономерностями распространения возмущений в атмосфере, вызванных сильными природными событиями, и описанием поведения атмосферы в условиях экстремальных возмущений [1, 2]. Одновременно с этим изучение эффектов, сопутствующих падению и взрывному разрушению болидов, позволяет расширить представления о механизмах взаимодействия и преобразования геофизических полей в приповерхностных слоях атмосферы [3].

Известные работы [4–7] посвящены изучению локальных возмущений в области взрывного разрушения болидов. При этом основное внимание уделяется оптическим эффектам, на основе которых оцениваются координаты взрыва и энергия события. Трудности, возникающие при разработке адекватных моделей, описывающих последствия входа болидов в атмосферу с учетом всех эффектов, связаны с недостатком наблюдатель-

ного материала. Имеющиеся к настоящему времени результаты инструментальных наблюдений и теоретических построений, касающихся волновых движений в атмосфере или же электромагнитных возмущений при падении болидов, [8–10] требуют статистического обоснования.

В настоящей работе на примере одного из событий 17.11.2021 г.¹ демонстрируются акустический и магнитный эффект болида, взрывное разрушение которого произошло в ~16:30 UTC в районе г. Ижевск.

В качестве исходных привлекались результаты инструментальных геомагнитных наблюдений, выполненных среднеширотными обсерваториями, входящими в сеть INTERMAGNET (табл. 1), и среднеширотной Геофизической обсерваторией “Михнево” (МНВ; 54.94° с.ш.; 37.73° в.д.) ИДГ РАН, а также данные регистрации микробарических вариаций в МНВ, в г. Звенигороде (ZVE; территория ИНАСАН; 55.69° с.ш.; 36.76° в.д.) и в Центре геофизического мониторинга г. Москвы (ЦГМ; 55.71° с.ш.; 37.57° в.д.) [11, 12]. Данные обсерваторий сети INTERMAGNET представляли собой цифровые ряды с периодом дискретизации 1 мин, обсерватории МНВ – цифровые ряды с частотой дискретизации 1 Гц. Акустическая регистрация выполнялась с частотой дискретизации 20 Гц.

¹ В эти же сутки 17.11.2021 г. в 14:50 UTC наблюдалось падение болида на северо-западе европейской части России в окрестности С.-Петербурга.

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

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

**E-mail: riabovasa@mail.ru

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

Таблица 1. Пункты геомагнитных наблюдений

Международный код	Расположение	Широта	Долгота	R , км	ΔB_H , нТл
ARS	Арты, РФ	56.43	58.57	~410	~2
BOX	Борок, РФ	58.07	38.23	~825	~3
MHV*	Михнево, РФ	54.94	37.73	~930	~3
KIV	Киев, Украина	50.72	30.3	~1600	~1.5
NVS	Новосибирск, РФ	54.85	83.23	~1930	~2.5
BEL	Бельск, Польша	51.84	20.79	~2085	~4
BDV	Будков, Чешская Республика	49.08	14.02	~2655	~2
BFO	Блэк Форест, Германия	48.33	8.32	~3045	~2.5
IRT	Иркутск, РФ	25.27	104.45	~3315	~3.5
CLF	Шамбон-ла-Форе, Франция	48.02	2.26	~3425	~2.5
HAD	Хартленд, Англия	51.0	355.52	~3635	~3
MMB	Мемамбецу, Япония	43.91	144.19	~6140	~2

Примечание. * – MHV не входит в сеть INTERMAGNET.

Метеорологические параметры атмосферы (температура T и влажность W воздуха, атмосферное давление P_0 , скорость ветра V , мощность солнечного излучения S_0) регистрировались с помощью цифровой автоматической метеостанции Davis Vantage Pro2.

Акустический эффект. Наблюдаемые инструментально микробарические вариации связаны с

ударной волной, вызванной взрывоподобным разрушением болида [6, 13]. Характеристики волнового возмущения, регистрируемого на больших эпицентральных расстояниях R от места взрыва болида преимущественно в виде инфразвуковых волн, определяются величиной выделенной в атмосферу энергии и состоянием самой атмосферы. Пример записи акустического сигнала

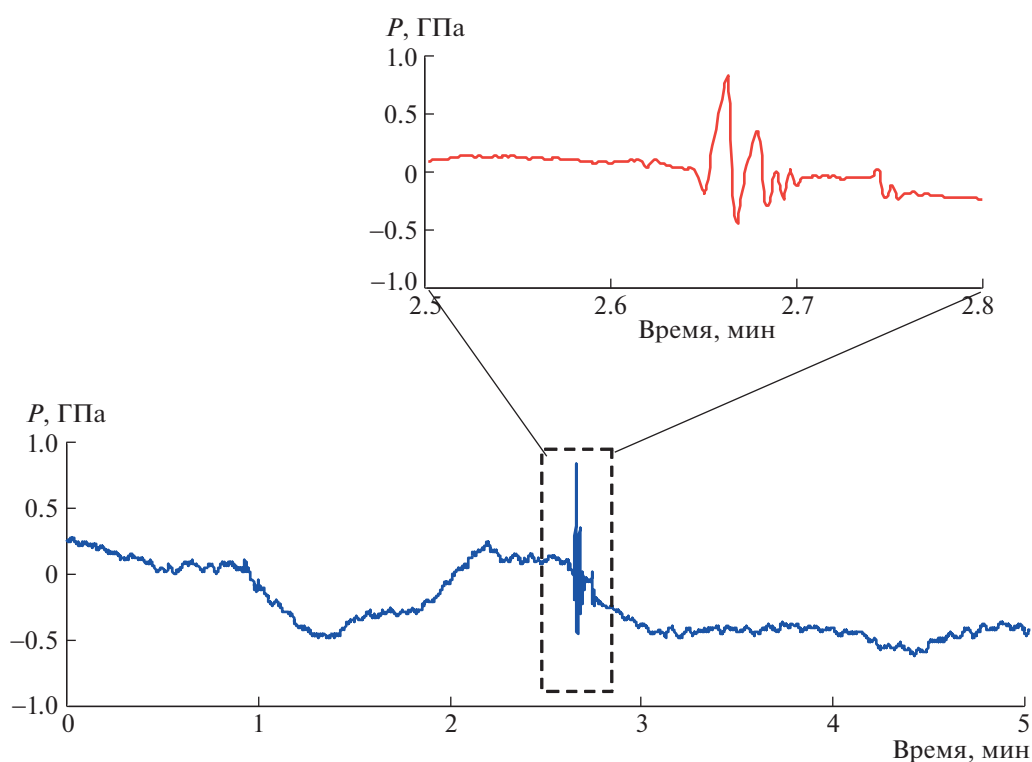


Рис. 1. Вызванный взрывом болида акустический сигнал по данным MHV.

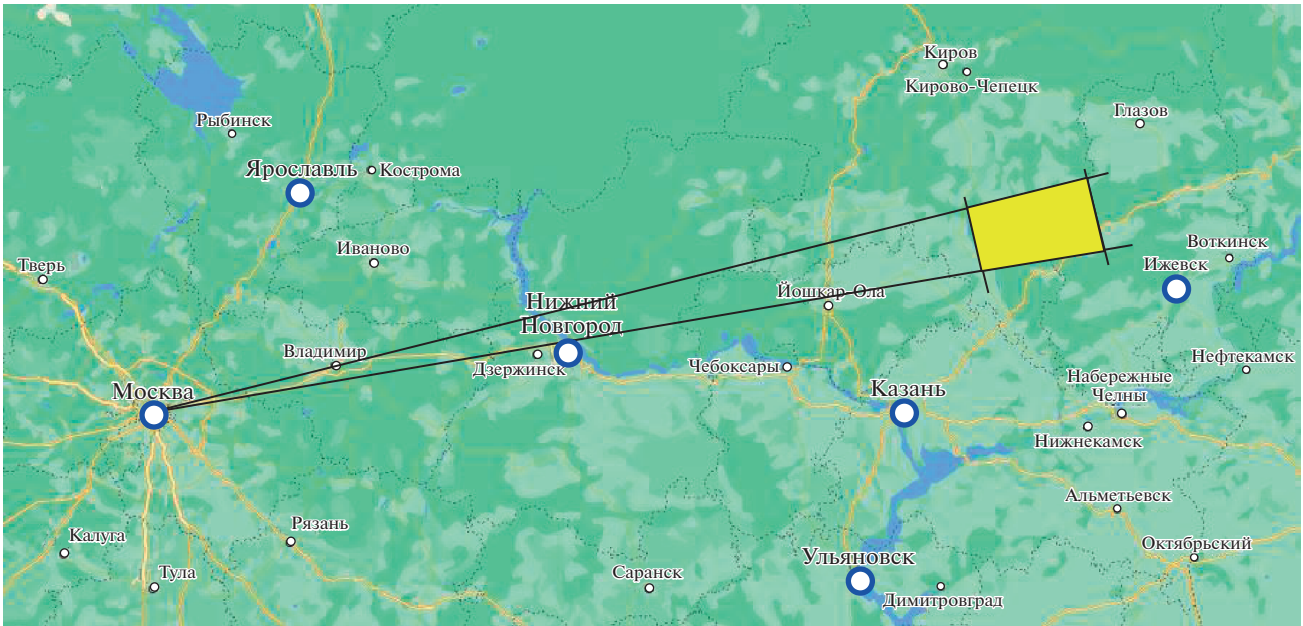


Рис. 2. Вероятная область взрывного разрушения болида (выделена желтым маркером) по результатам анализа акустического сигнала.

ла, вызванного взрывом болида 17.11.2021 г., приведен на рис. 1 (данные МНУ). Следует отметить, что сигналы, зарегистрированные в ZVE и ЦГМ, близки по характеристикам к сигналу, приведенному на рис. 1. Зарегистрированные в разных пунктах сигналы распространялись с примерно одинаковой скоростью (~306–310 м/с). Регистрация в трех пунктах позволила оценить эпицентральную область взрывного разрушения болида, которая представлена на рис. 2. Согласно нашим

оценкам, можно принять, что эпицентр взрыва болида находился ориентировочно в точке с координатами 57.48° с.ш. и 52.09° в.д.

Результаты спектрального анализа акустического сигнала приведены на рис. 3 (для примера выбран сигнал, зарегистрированный в ZVE). Из рис. 3 следует, что максимум спектральной плотности соответствует частоте ~0.94 Гц. Оценка энергии взрыва болида Q выполнялась на основе метода, предложенного в работах [14, 15]. Метод основан на свойстве вызванного взрывом акустического сигнала сохранять значение преимущественной частоты f_0 при его распространении на значительные расстояния. В нашем случае оценка дает значение $Q \approx (8-9) \times 10^{10}$ Дж.

Геомагнитный эффект. Анализ результатов инструментальных наблюдений, выполненный в настоящей работе, показывает, что падение болида сопровождалось характерными вариациями магнитного поля. Следует отметить, что сутки 17.11.2021 г. характеризовались невозмущенными магнитными условиями (в табл. 2 приведены значения K_p -индекса и станционного (МНУ) K -индекса магнитной активности). Это значительно облегчило выделение вызванных болидом вариаций магнитного поля на фоне суточного хода. На рис. 4 приведены вариации наиболее чувствительной к внешним воздействиям горизонтальной компоненты магнитного поля B_H в период взрывного разрушения болида по данным обсерваторий INTERMAGNET и обсерватории МНУ. Из графиков рис. 4 следует, что взрыв болида вызвал бухтообразное уменьшение B_H на всех рас-

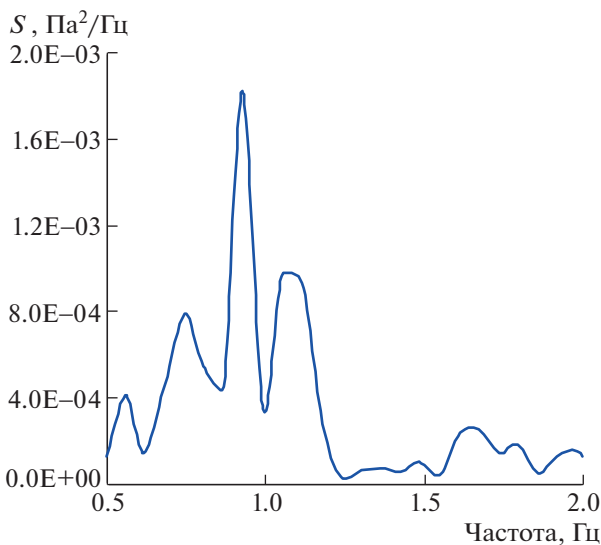


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности от частоты акустического сигнала (по данным ZVG).

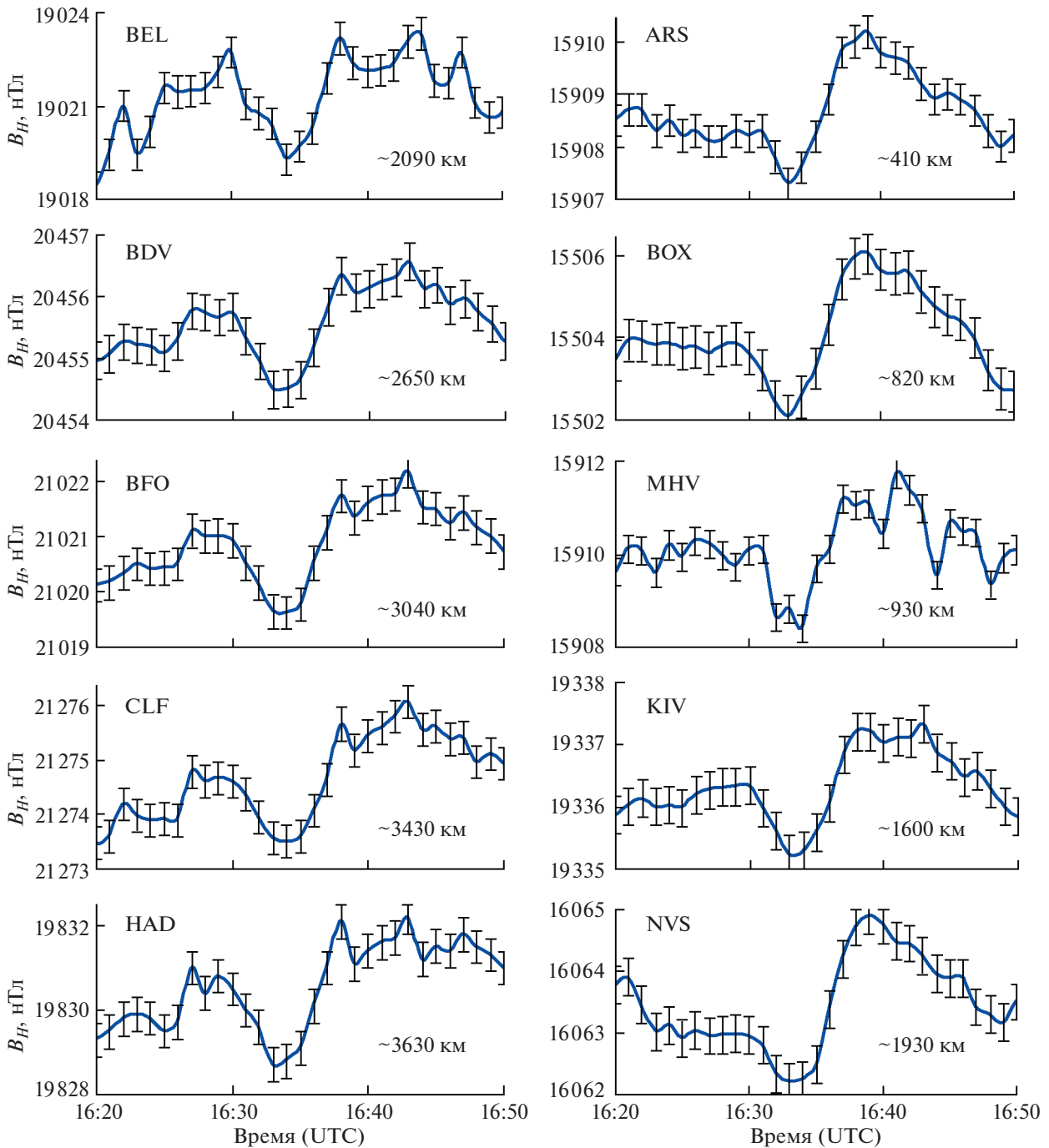


Рис. 4. Вариации горизонтальной компоненты магнитного поля в период взрывного разрушения болида на разных эпицентральных расстояниях (значения R приведены в поле рисунков).

Таблица 2. Индексы магнитной активности за 17.11.2021 г.

Индекс	Время суток							
	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
K	2	2	2	2	1	2	3	2
K_p	3	2	3	3	2	2	2	3

смотренных эпицентральных расстояниях R . При этом максимальная амплитуда вызванных взрывом болида вариаций горизонтальной составляющей магнитного поля ΔB_H заключена в узком интервале: от ~ 1.5 до ~ 4 нТл (табл. 1). Характерно, что вызванные вариации наблюдаются во всех обсерваториях примерно в одно и то же время, близкое ко времени взрыва болида. В данном случае

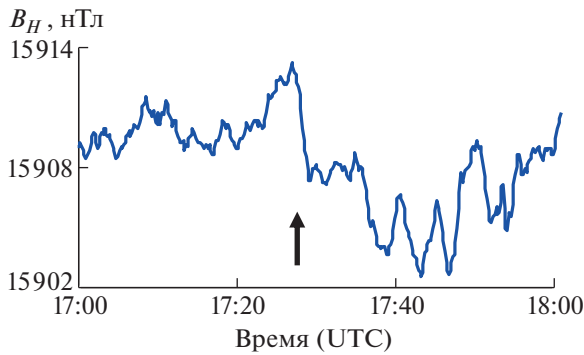


Рис. 5. Вызванные вариации горизонтальной компоненты магнитного поля в период прихода акустического сигнала в МНУ.

это может свидетельствовать о глобальном характере возмущения магнитного поля, либо высокой скорости распространения вызванного болидом локального возмущения по ионосфере.

Результаты инструментальных наблюдений показывают, что помимо геомагнитных вариаций в период взрыва болида отчетливо регистрируются вариации магнитного поля в период прихода в точку наблюдений вызванного взрывом акустического сигнала. На рис. 5 приведены возмущения магнитного поля, вызванные приходом акустического сигнала. Из рис. 5 видно, что пришедший в МНУ в ~17:27 UTC акустический сигнал вызвал бухтообразное уменьшение горизонтальной компоненты геомагнитного поля в течение ~30 мин, осложненное знакопеременными вариациями ΔB_H .

В целом можно констатировать, что взрывное разрушение болида вызывает не только волновые возмущения в атмосфере, но и значимые по амплитуде геомагнитные вариации в приземной атмосфере, причем как в период взрыва болида, так и в период прихода акустического сигнала в точку регистрации.

Вопрос о механизмах, определяющих вариации магнитного поля Земли непосредственно в период взрывных разрушений космических объектов, окончательно не решен. Полученные данные свидетельствуют о значительных скоростях распространения сигнала (не менее десятков км/с), а также высокой синхронности наведенных геомагнитных вариаций в пунктах, расположенных на разных, в ряде случаев значительных, расстояниях друг от друга. Вероятнее всего возмущение магнитного поля вызывается в этом случае акустическим воздействием на ионосферу Земли в эпицентральной зоне события.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены по государственному заданию № 122032900185-5 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 384 с.
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. 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.
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. 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.
7. Beech M., Foschini L.A. A Space Charge Model for Electriphonic Busters // Astron. Astrophys. 1999. V. 345. P. L27–L31.
8. 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.
9. Ковалева И.Х., Ковалев А.Т., Попова О.П. и др. Электромагнитные эффекты, генерируемые в ионосфере Земли при падении метеоритов // Динамические процессы в геосферах. 2014. Вып. 5. С. 26–47.
10. Price C., Blum M. ELF/VLF Radiation Produced by the 1999 Leonid Meteors // Earth, Moon, Planets. 2000. V. 82/83. P. 545–554.
11. 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. 108–120.
12. Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А. Аппаратура и методики для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 2. С. 65–78.
13. Edwards W.N. Meteor Generated Infrasound: Theory and Observation / In: Infrasound Monitoring for

- Atmosph. Stud. Springer, Dordrech. 2010. P. 361–414.
14. 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.
15. Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Инфразвук в атмосфере. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2020. 332 с.

ACOUSTIC AND MAGNETIC EFFECT OF A FALLING BOLIDE ON NOVEMBER 17, 2021

Yu. S. Rybnov^{a,#}, S. A. Riabova^{a,##}, and A. A. Spivak^{a,###}

^aSadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#]E-mail: y.rybnov@mail.ru

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

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

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin February 25, 2022

The results of instrumental observations of acoustic oscillations and geomagnetic variations during the fall of the fireball on November 17, 2021 near the city of Izhevsk (Russia) are presented. It is shown that the fireball explosion was accompanied by an acoustic signal and manifested itself in magnetic field variations. Based on the data of acoustic observations performed at three points, the probable region of the fireball destruction was determined and the energy of the acoustic source was estimated. It is noted that the geomagnetic effect caused by the fireball explosion has a non-local character and is observed at epicentral distances up to ~4000 km.

Keywords: bolide, acoustic vibrations, magnetic field, variations