

УДК 550.3:550.385:552.6

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ВЫЗВАННЫЕ ПАДЕНИЕМ И ВЗРЫВОМ ЯКУТСКОГО БОЛИДА 03.12.2024 г.

© 2026 г. А. А. Спивак*, С. А. Рябова**, Ю. С. Рыбнов,
С. П. Соловьев, А. В. Тихонова

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

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

***E-mail: riabovasa@mail.ru*

Приведены результаты инструментальных наблюдений, выполненных в период пролета и взрывного разрушения Якутского болида. Показано, что болид вызвал вариации магнитного поля Земли амплитудой 5–25 нТл на расстояниях до ~ 6600 км, а также вариации в приземной атмосфере электрического поля амплитудой ~ 100 В/м и микробарические вариации в виде инфразвукового сигнала, распространяющегося по атмосферному волноводу, амплитудой ~ 15 Па на расстоянии ~ 4500 км от места падения космического тела.

Ключевые слова: болид, магнитное поле, инфразвук, электрическое поле, вариация.

Для цитирования: Спивак А.А., Рябова С.А., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Тихонова А.В. Геофизические эффекты, вызванные падением и взрывом Якутского болида 03.12.2024 г. // Динамические процессы в геосферах. 2026. Т. 18. № 1. С. 68–75. http://doi.org/10.26006/29490995_2026_18_1_68

Введение

Сильные атмосферные явления, сопровождающие падения космических тел на Землю, вызывают не только нагрев и свечение воздушных масс, но, что важно, возмущение геофизических полей [Катастрофические, 2005]. Изучение геофизических эффектов, сопутствующих в первую очередь падениям болидов, представляет значительный интерес с точки зрения получения данных о характере воздействия космических тел на атмосферу Земли. Помимо этого, такая информация является необходимой основой для практической верификации теоретических и численных моделей, разрабатываемых для описания реакции внешних геосфер на сильные локальные возмущения.

Известные работы касаются в основном описания локальных возмущений, которые вызываются космическими телами в атмосфере [Адушкин и др., 2004; Бернгард и др., 2013; Adushkin, Nemchinov, 1994; Beech, Forschini, 1999] и др. При этом отмечается, что такие локальные явления и процессы, вызванные пролетом и в ряде случаев взрывным разрушением космических тел, могут приводить к возмущениям атмосферного электромагнитного поля [Немчинов и др., 1999; Adushkin, Nemchinov, 1994]. В связи с этим предлагаются механизмы и модели процесса возбуждения электромагнитного сигнала [Ковалева и др., 2014; Keay, 1992; Price, Blum, 2000] и др.

Вместе с тем имеющиеся теоретические модели не всегда в состоянии всесторонне описывать многие свойства низкочастотных электромагнитных сигналов, в частности вызванных космическими телами вариаций физических полей – магнитного и электрического. В первую очередь это связано с недостатком наблюдательных данных.

В настоящей работе рассматриваются эмпирические данные в виде результатов инструментальных наблюдений за вариациями атмосферного электрического поля, геомагнитными и микробарическими вариациями. При этом рассматривается конкретный источник возмущения – падение и взрывное разрушение Якутского болида 03.12.2024 г. (<https://www.e1.ru/text/science/2024/12/03/74836694/>).

Результаты инструментальных наблюдений

Падение Якутского болида было зафиксировано 03.12.2024 г. в 16:15 UTC. Место падения болида указывается в районе между населенными пунктами Ленск (на расстоянии ~ 196 км) и Олекминск (на расстоянии ~ 120 км). По данным Европейского космического агентства (ЕКА), которое заранее предсказало падение указанного космического тела, оно представляло собой небольшой астероид (C0WEP5) размером около 70 см.

Адаптированные кадры пролета Якутского болида приведены на рис. 1. Из рис. 1 следует, что наблюдались, по крайней мере, две-три хорошо выраженные эксплозивные стадии болида (кадры 5–8).



Рис. 1. Кадры, характеризующие свечение Якутского болида в разные моменты времени (время между кадрами ~ 0.5 с). Источник – видеозапись с сайта <https://www.e1.ru/text/science/2024/12/03/74836694/>

Анализ данных инструментальных наблюдений свидетельствует о том, что взрывное разрушение болида вызвало вариации основных геофизических полей.

Вариации электрического поля

Результаты регистрации, выполненной в Центре геофизического мониторинга Москвы ИДГ РАН (расстояние до места падения болида ~ 4500 км) [Рыбнов и др., 2023] свидетельствуют о том, что падение и взрывное разрушение космического тела вызвало хорошо выраженные вариации вертикальной компоненты атмосферного электрического поля E_z , зарегистрированные на земной поверхности. Результаты регистрации E_z , выполненной в период падения болида, приведены на рис. 2. Из рис. 2 следует, что примерно в 17:22 UTC¹ (т.е. спустя ~ 60 мин после первой эксплозивной стадии болида) зарегистрировано начало знакопеременных вариаций E_z , амплитуда которых к ~ 17:35 UTC достигла ~ 100 В/м. Поскольку источником возмущений электрического поля является сам болид, можно оценить скорость распространения возмущений электрического поля с учетом расстояния от места регистрации до места падения болида и временем возникновения электрического эффекта. По нашим данным она составила ~ 1.2 км/с, что согласуется с имеющимися данными о скоростях распространения перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ).

¹ Время начала вариаций оценено с учетом возникновения «регулярных» знакопеременных вариаций E_z и их амплитуды

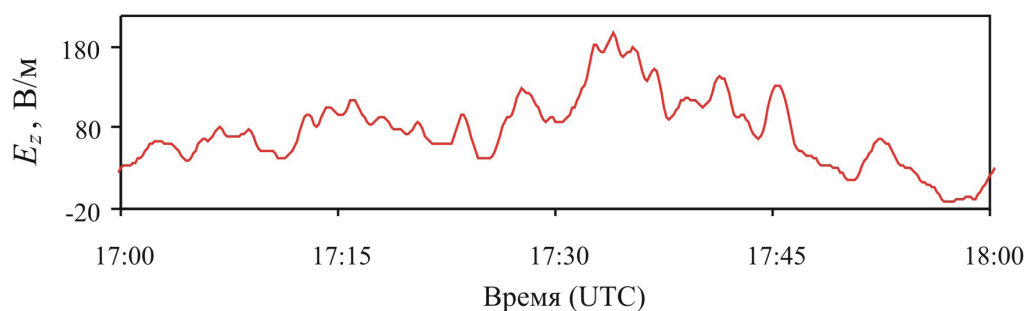


Рис. 2. Фрагмент записи атмосферного электрического поля в период падения и взрыва Якутского болида 03.12.2024 г.

Геомагнитные вариации

На рис. 3 приведен фрагмент магнитной записи наиболее чувствительной к внешним возмущениям основной горизонтальной компоненты магнитного поля B_x , полученной в период падения болида. Из рис. 3 видно, что геомагнитное возмущение отмечается, начиная с $\sim 17:30$ UTC, и представляет собой последовательные положительные бухты амплитудой около 10 и 15 нТл.

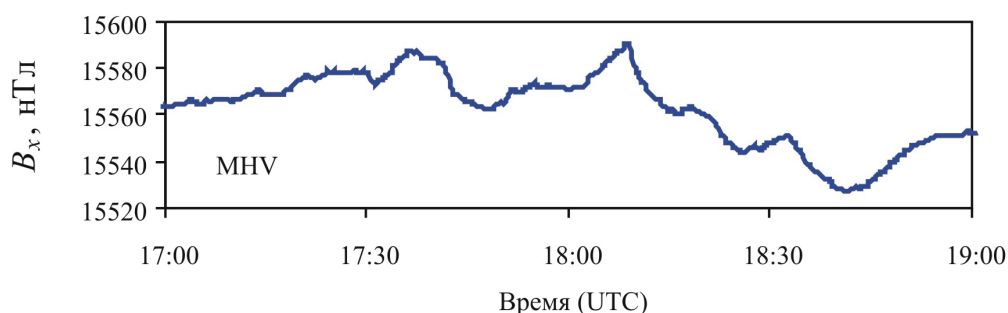


Рис. 3. Фрагмент записи вариаций магнитного поля в период падения Якутского болида

С целью подтверждения результатов регистрации, выполненной в ИДГ РАН, в настоящей работе анализировались также данные, полученные при магнитных измерениях в ряде обсерваторий международной сети INTERMAGNET, расположенных на разных расстояниях R от места падения болида (Табл. 1).

Таблица 1.

Данные по магнитным обсерваториям (здесь: B_x^* – максимум геомагнитной вариации)

Код	Страна	GEO		R , км	B_x^* , нТл
		Широта	Долгота		
IRT	Россия	52.17° N	104.45° E	~ 1240	~ 7.1
NVS	Россия	54.85° N	83.23° E	~ 2140	~ 24.0
BMT	Китай	40.30° N	116.20° E	~ 2260	~ 10.0
MMB	Япония	43.91° N	144.19° E	~ 2530	~ 8.9
ARS	Россия	56.43° N	58.56° E	~ 3370	~ 16.1
BEL	Польша	51.83° N	20.79° E	~ 5530	~ 25.3
BDV	Греция	49.08° N	14.02° E	~ 6070	~ 15.5
CLF	Франция	48.02° N	02.26° E	~ 6640	~ 5.1

Данные, полученные в этих обсерваториях, приведены ниже на рис. 4. Из рис. 4 следует: время начала вариаций магнитного поля на разных расстояниях составляет по оценкам авторов интервал 17:17–17:20 UTC, что обусловлено временем формирования токовой системы – источника возмущений².

² В статье не рассматриваются вопросы, связанные с источниками магнитных и электрических эффектов. Приводятся только результаты наблюдений.

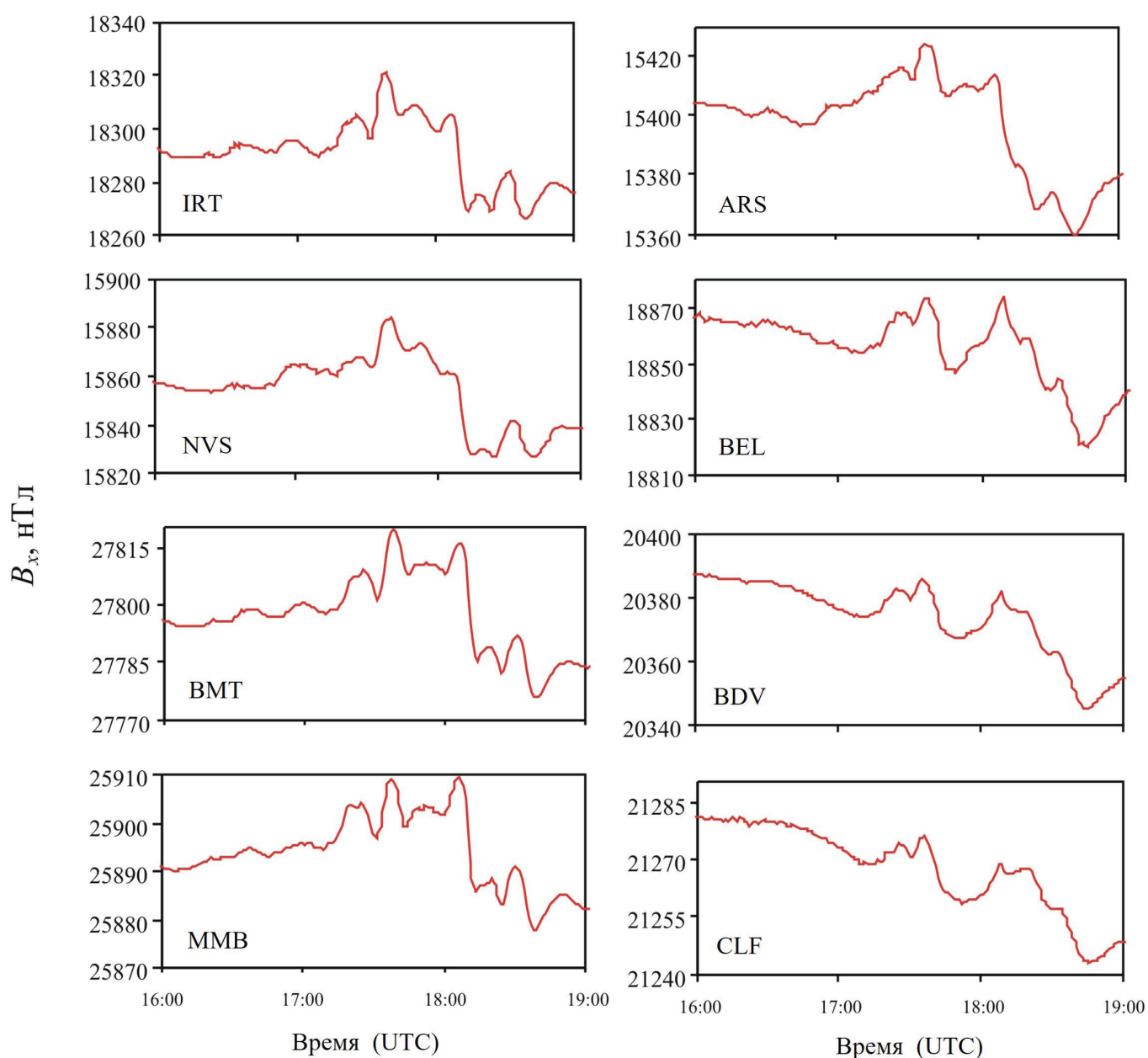


Рис. 4. Вариации магнитного поля в период падения болида (коды обсерваторий сети INTERMAGNET указаны в поле рисунка)

Анализ степени затухания амплитуды вызванного магнитного возмущения B_x^* с расстоянием R (рис. 5) показывает, что зависимость $B_x^*(R)$ может быть представлена в виде:

$$B_x^* = 27.069 - 0.003 \cdot R \text{ нТл}, \quad (1)$$

где R выражено в км.

Микробарические вариации

Благоприятное стечение обстоятельств для распространения акустического сигнала: высота начала эксплозивной стадии болида (~ 90 км), скорость ветра, не превышающая 3 м/с, и невозмущенная атмосфера способствовали распространению вызванного болидом акустического сигнала на большие расстояния. Это позволило зарегистрировать вызванные болидом микробарические вариации в

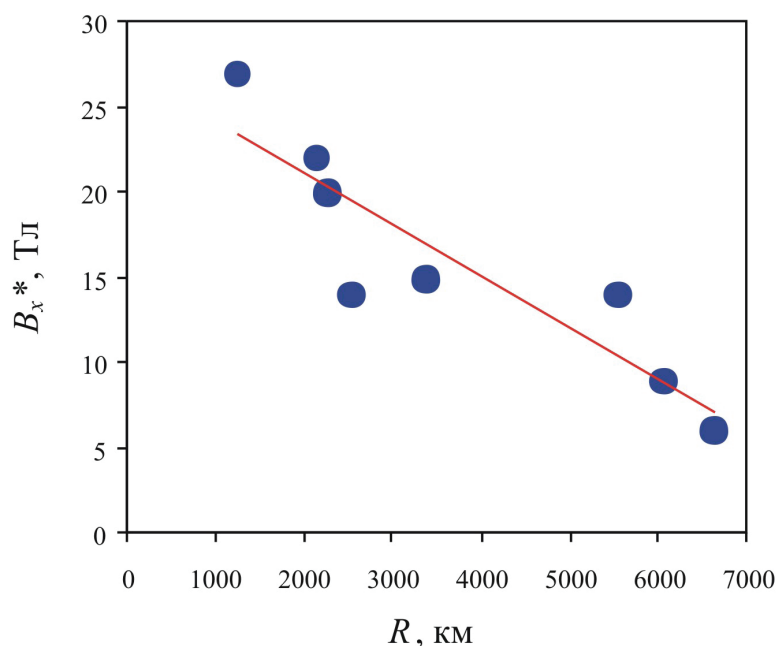


Рис. 5. Амплитуда вызванных болидом геомагнитных вариаций в зависимости от расстояния R

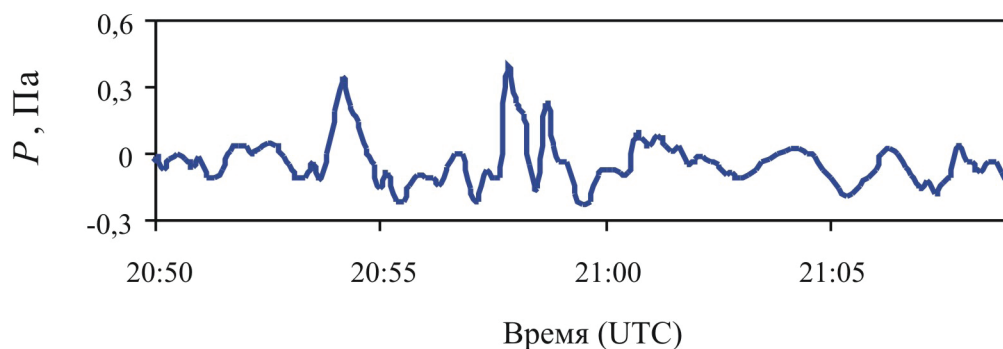


Рис. 6. Акустический сигнал, вызванный взрывным разрушением Якутского болида 03.12.2024 г.

ИДГ РАН на расстоянии ~ 4500 км. Поиск сигнала осуществлялся с учетом расстояния до болида и примерной скорости распространения сигнала по атмосферному волноводу (285–320 м/с). Форма акустического сигнала, зарегистрированного в ИДГ РАН, приведена на рис. 6.

Как это следует из рис. 6, приход сигнала в ИДГ РАН зарегистрирован в $\sim 20:54$ UTC, что определяет скорость распространения сигнала примерно 310 м/с, что соответствует скорости распространения инфразвуковых волн по стратосферному волноводу [Куличков и др., 2004]. Действительно, с учетом значительного удаления от источника можно принять, что сигнал представляет собой не результат «прямого» распространения акустических возмущений вдоль земной поверхности, а возмущение, распространяющееся по атмосферному волноводу [Адушкин и др., 2020]. На записи хорошо выделяются три характерных «всплеска», что с известными допущениями, связанными с неточностью оценки времен эксплозий, можно интерпретировать в качестве результатов трех эксплозивных стадий болида. Средняя частота вызванных микробарических вариаций составляет ~ 0.01 Гц.

Таким образом, установлено, что пролет и эксплозия болида вызвали не только магнитные и электрические эффекты, но также микробарические вариации в виде инфразвуковых волн амплитудой ~ 0.4 – 0.5 Па, распространяющихся по стратосферному волноводу, на значительном удалении от источника.

Для сравнения имеет смысл рассмотреть эксплозивное разрушение Витимского болида, произошедшее 24.09.2002 г. примерно в том же районе, что и рассматриваемый Якутский болид

[Адушкин и др., 2004]. Зарегистрированный в ИДГ РАН акустический сигнал, вызванный Витимским болидом, приведен на рис. 7.

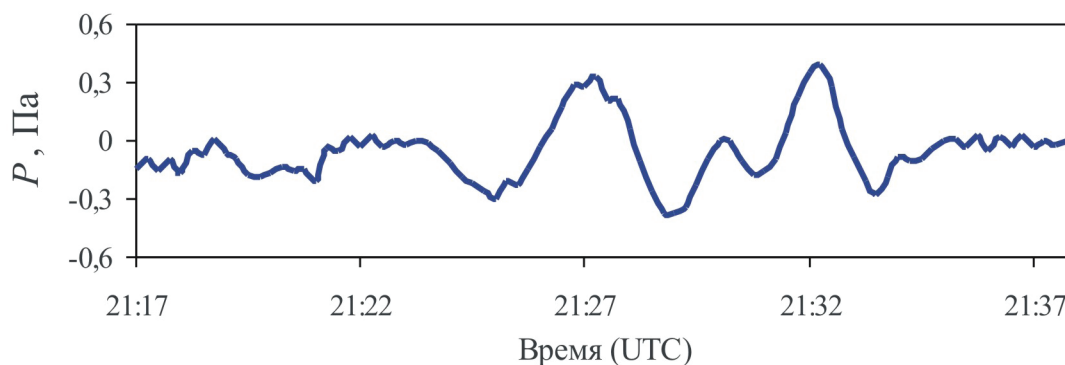


Рис. 7. Акустический сигнал, вызванный взрывным разрушением Витимского болида 24.09.2002 г.

По сигналам, зарегистрированным станциями, расположенными в районе городов Залесово, Уссурийск, Подольск [Адушкин и др., 2004] и данным [Шумилов и др., 2003] энергия Витимского болида E была оценена в $\sim 2\text{--}3$ кт в тротильном эквиваленте ($8 \cdot 10^{12}$ – $1.3 \cdot 10^{13}$ Дж). Оценка энергии проводилась по зависимости, приведенной в [Reed, 1972]:

$$\Delta P = 11.8 \cdot E^{0.4} \cdot R^{-1.2}, \quad (2)$$

где ΔP – амплитуда сигнала [кПа], E – энергия источника [кт], R – расстояние [км].

Оценки, выполненные с использованием зависимости (1) для случая Якутского болида, дают значение $E \sim 0.8\text{--}1$ кт ($3\text{--}4 \cdot 10^{12}$ Дж).

Заключение

Рассмотрение результатов инструментальных наблюдений в очередной раз на примере Якутского болида 03.12.2024 г. демонстрирует реакцию геофизической среды на пролет и взрывное разрушение космического тела. Приведены данные, свидетельствующие о том, что болидам сопутствуют хорошо выраженные эффекты в виде магнитного и электрического полей, а также микробарических вариаций в приземном слое атмосферы. При этом указанные эффекты регистрируются на значительном расстоянии от места падения космического тела.

Необходимо отметить, что вопрос, связанный с определением источников и механизмов, вызывающих указанные эффекты, представляется авторам весьма важным и требует отдельного детального рассмотрения.

Финансирование

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012700798-8).

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., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Инфразвук в атмосфере. М. : ТОРУС ПРЕСС. 2020. – 332 с.

Бернгард О.И., Добрынина А.А., Жеребцов Г.А. и др. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеорита // Доклады академии наук. 2013. Т. 452. № 2. С. 205–207. <http://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. 2014. № 5. С. 26–47. <https://www.elibrary.ru/tmzfdp>

Куличков С.Н., Авилов К.В., Буш Г.А. и др. Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 3–12. <https://www.elibrary.ru/ovzpxb>

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. 1999. С. 324–338.

Рыбнов Ю.С., Крашенинников А.В., Локтев Д.Н., Рыбнов С.Ю., Соловьев С.П., Спивак А.А. Развитие системы комплексных инструментальных наблюдений за геофизическими полями в Центре геофизического мониторинга Москвы ИДГ РАН // Сейсмические приборы. 2023. Т. 59. № 1. С. 33–47. <https://doi.org/10.21455/si2023.1-3>

Шумилов О.И., Касаткина Е.А., Терещенко Е.Д., Куличков С.Н., Васильев А.Н. Регистрация инфразвука от Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. № 2. С. 121–123.

Adushkin V.V., Nemchinov I.V. Consequences of impacts of cosmic bodies on the surface of the Earth. In: Hazards due to Comets and Asteroids / Ed. T. Gehrels. Tucson; London: Univ. Arizona Press. 1994. P. 721–778.

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>

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>

Reed J.W. Air blast overpressure decay at long ranger // J. Geoph. Res. 1972. Vol. 77 (9). P. 1623–1629. <https://doi.org/10.1029/JC077i009p01623>

GEOPHYSICAL EFFECTS CAUSED BY THE FALL AND EXPLOSION OF THE YAKUTIAN BOLIDE ON DECEMBER 3, 2024

© 2026 A. A. Spivak*, S. A. Riabova**, Yu. S. Rybnov, S. P. Soloviev, A. V. Tikhonova

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

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

***E-mail: riabovasa@mail.ru*

We present the results of instrumental observations conducted during the fall and explosive destruction of the Yakutian bolide. It was shown that the bolide caused variations in the Earth's magnetic field with an amplitude of 5–25 nT at distances of up to ~ 6600 km, as well as variations in the electric field in the near-surface atmosphere with an amplitude of ~100 V/m, and microbaric variations in the form of an infrasound signal propagating along an atmospheric waveguide with an amplitude of ~ 15 Pa at a distance of ~ 4500 km from the impact site.

Keywords: bolide, magnetic field, infrasound, electric field, variation.