

Научная статья
УДК 550.388.2
doi:10.37614/2949-1185.2023.2.2.006

ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВЗРЫВОВ СИБИРСКИХ МЕТЕОРОВ

Сергей Михайлович Черняков

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия, smcherniakov@gmail.com,
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8554-6744>

Аннотация

Рассмотрена реакция геомагнитного поля на разрушение метеоров в Якутии (4 марта 2014 г.) и Хакасии (6 декабря 2016 г.) по данным магнитной обсерватории «Иркутск». Анализ вариаций компонент геомагнитного поля показал, что пролет и взрывы метеоров сопровождались появлением геомагнитных возмущений в районе обсерватории. Их появление может быть вызвано распространением ударных, внутренних гравитационных и магнитогидродинамических волн, образовавшихся в результате пролета и разрушения метеоров. Оценены периоды этих волновых возмущений и скорости их распространения от областей генерации.

Ключевые слова:

метеор, взрыв, волна, геомагнитное поле, вейвлет, спектр

Благодарности:

автор благодарен С. В. Николашкину за предоставленную информацию по Вилуйскому метеору, Р. А. Рахматулину за предоставление геомагнитных данных магнитной обсерватории «Иркутск».

Original article

GEOMAGNETIC EFFECTS OF SIBERIAN METEOR EXPLOSIONS

Sergei M. Cherniakov

Polar Geophysical Institute, smcherniakov@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8554-6744>

Abstract

The geomagnetic effects of falling meteors have been known for a long time, but so far they have not received a complete theoretical explanation. The paper considers the response of the geomagnetic field to the destruction of meteors in Yakutia (March 4, 2014, 21:29 UT) and Khakassia (December 6, 2016) according to the Irkutsk magnetic observatory data of the Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS. The analysis of variations in the geomagnetic field components showed that the passages and explosions of meteors were accompanied by the appearance of several groups of geomagnetic disturbances in the area of the Irkutsk magnetic observatory. Their appearance can be caused by the propagation of shock, internal gravity and magnetohydrodynamic waves formed as a result of the passages and destructions of meteors. The periods of these wave disturbances and the velocities of their propagation from the generation regions are estimated. It is noted that noticeable wave manifestations in the geomagnetic field give waves with a period of more than 10 minutes, i.e. having gravity modes.

Keywords:

meteor, explosion, wave, geomagnetic field, wavelet, spectrum

Acknowledgments:

the author is grateful to S. V. Nikolashkin for providing information on the Vilyui meteor, and to R. A. Rakhmatulin for providing geomagnetic data from the Irkutsk magnetic observatory.

Введение

Геомагнитное поле является индикатором многих процессов, происходящих на Земле, в окружающем пространстве и на Солнце (Яновский, 1972; Нишида, 1980). Изменения в геомагнитном поле вызываются естественными причинами: солнечными вспышками, процессами в магнитосфере и ионосфере Земли, полетом метеороидов в атмосфере Земли, а также различными искусственными явлениями: мощными взрывами химических и ядерных боеприпасов, запусками и полетом ракет, модификацией ионосферы мощными радиоволнами и т. д. (Воздействие ..., 2016). Разветвленная сеть магнитометрических станций, расположенных по всему земному шару, позволяет непрерывно и высокой точностью измерять вариации геомагнитного поля. Тем самым появляется возможность контролировать изменения в околоземной плазме, вызванные воздействием на нее различных источников.

Вариации геомагнитного поля представляют собой наложение различных возмущений геомагнитного поля. Их идентификация представляет порой достаточно сложную задачу. Задача облегчается, если известны параметры явления, вызвавшего возмущение (место, время, характеристики и т. д.). Тем не менее до сих пор отклик геомагнитного поля на различные естественные и искусственные процессы изучен не до конца.

Все это также относится к влетающим в земную атмосферу метеороидам, полет которых сопровождается различными процессами: нагревом, испарением частиц космического тела, сгоранием и разрушением метеороида, иногда в виде взрыва, ионизацией атмосферы, генерацией различных типов волн, в том числе электромагнитных, ударных, акустико-гравитационных, медленных магнитогидродинамических, а также возмущениями геомагнитного поля (Бронштэн, 1981; Катастрофические ..., 2005). Эффект влияния на геомагнитное поле пролетов и разрушение метеороидов также изучен недостаточно. До сих пор существуют различные механизмы генерации геомагнитных возмущений (Иванов, 1964; Бронштэн, 2002; Ковалев и др., 2006; Черногор, 2014; Шайдуров, 2015).

Поскольку полеты больших метеоров фиксируются средствами мониторинга окружающей среды, то их можно описать количественно и, таким образом, получить представление о характеристиках источника возможных вариаций в геомагнитном поле (время, место, энергия, световые и акустические проявления и т. д.). Метеороиды (размером от 1 м) при своем разрушении в результате взрывов, в отличие от более мелких, вызывают появление ударных волн и, более редко, плюма (выброс высокоскоростной струи плазмы на высоты в десятки-сотни километров). Эти эффекты приводят к иным механизмам воздействия на геомагнитное поле в отличие от разрушения (как правило, сгорания) мелких метеоров.

Большое количество работ, посвященных влиянию пролетов космических тел в атмосфере Земли на геомагнитное поле, рассматривали реакцию геомагнитного поля на взрыв Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. (Плеханов и др., 1960; Иванов, 1961, 1964). В течение многих лет и до сих пор тунгусская катастрофа привлекает внимание исследователей, в том числе и эффекты воздействия взрыва Тунгусского метеорита на магнитное поле Земли (Бронштэн, 2002; О возможной геоэффективности..., 2013; Шайдуров, 2015; Рахматулин, 2019).

За последние годы вариации геомагнитного поля были рассмотрены для достаточно больших взрывов метеороидов: Витимского болида (24 сентября 2002 г.) (Черногор, 2011) и Челябинского суперболида (15 февраля 2013 г.) (О возможной геоэффективности..., 2013; Черногор, 2014; Рахматулин, 2019), Липецкого метеора (Спивак, Рябова, 2019; Черногор, 2020).

Целью работы является рассмотрение реакции геомагнитного поля на пролеты и взрывы Вилуйского (Якутия, 4 марта 2014 г. 21:29 UT) и Саяногорского (Хакасия, 6 декабря 2016 года 11:37 UT) метеоров.

Материалы и методы

Магнитная обсерватория «Иркутск» Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН) основана в 1887 г. и расположена в пос. Патроны на расстоянии 21 км от Иркутска. В настоящее время обсерватория проводит круглосуточный круглогодичный мониторинг абсолютного и переменного магнитного поля Земли. Координаты вариационного павильона в геомагнитной обсерватории «Иркутск», где расположена магнитовариационная станция (МВС) (52,23° с. ш., 104,25° в. д.).

Обработка геомагнитных данных выполнялась с использованием пакета прикладных программ языка программирования MatLab. Для выделения периодических составляющих использовался цифровой полосовой эллиптический фильтр (фильтр Кауэра). Его особенностью является крутой спад амплитудной характеристики, что позволяет добиться более эффективного разделения частот, чем при использовании других линейных фильтров. Периоды среза задавались в каждом конкретном случае. Для вейвлет-анализа спектральных составляющих данных использовался вейвлет Морле (Смоленцев, 2009). На рисунке 1 показан пример цифрового полосового эллиптического фильтра, используемого для спектрального анализа геомагнитных данных.

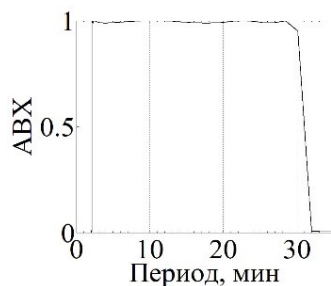


Рис. 1. Амплитудно-временная характеристика (ABX) полосового эллиптического фильтра

Результаты

Вилуйский метеор

Характеристики метеора, место и параметры его взрыва

4 марта 2014 г. в 21:29 UT в небе над Вилуйским районом Якутии многие жители района наблюдали яркую вспышку. Согласно предварительным выводам экспедиции ИКФИА СО РАН им. Ю. Г. Шафера (руководитель С. В. Николашкин) в атмосферу влетел метеороид, который затем превратился в мощный метеор. Было установлено, что тело вошло в атмосферу с северо-запада с наклоном около 45° и скоростью около 32 км/с. Обработка данных видеорегистрации позволила найти эпицентр взрыва с точностью до 4 км по ширине и 9 км в длину и определить приблизительные координаты взрыва ($64,3^\circ$ с. ш., $123,1^\circ$ в. д.) (рис. 2). Расстояние от места взрыва до магнитной обсерватории «Иркутск» — около 1720 км (рис. 3).



Рис. 2. Карта местности в районе взрыва Вилуйского метеора и место его разрушения (красный эллипс)

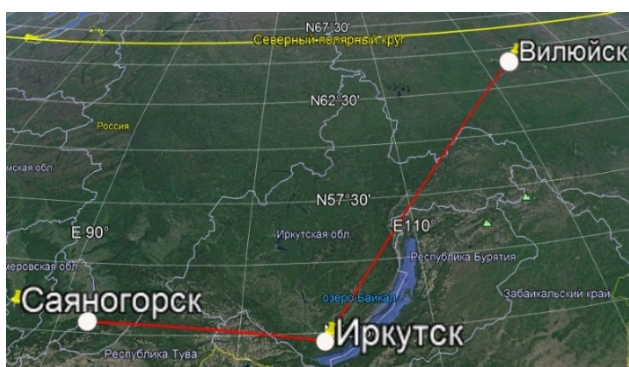


Рис. 3. Места взрывов Вилуйского и Саяногорского метеоров и положение магнитной обсерватории «Иркутск»

Разрушение метеороида произошло на высотах от 16 до 24 км в результате сильного нагрева небесного тела. По предварительной оценке, метеороид имел размер около 1 м в диаметре, а мощность взрыва, рассчитанная по продолжительности вспышки, оценивалась в 0,5–1 кт в тротиловом эквиваленте. Как правило, каменные метеороиды, имеющие такую скорость, полностью сгорают в воздухе. Только метеороиды большого размера или железные метеороиды могут достичь Земли. Согласно свидетельствам очевидцев и записей видеорегистрации, после взрыва Вилуйского метеора все же часть его осколков достигла поверхности земли.

Геофизическая обстановка

Согласно данным Мирового центра данных в Киото¹, в момент взрыва геомагнитная обстановка была спокойной. В таблице 1 приведены значения трехчасового планетарного геомагнитного индекса Кр в день взрыва и в контрольные дни, в верхней строчке таблицы указано всемирное время.

Таблица 1

Значения планетарного геомагнитного индекса Кр

Дата	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24	ΣКр
04.03.2014	2	1	0+	2	2+	2	1	2+	13
05.03.2014	1+	1–	1+	2–	2	2	2	2	13
07.03.2014	0+	0	0+	0	1	1–	1–	1–	4–
08.03.2014	1–	0+	1–	1–	1–	1–	0	1	4+

Во время наблюдений метеора не было найдено других возможных источников возмущений в геомагнитном поле (запусков ракет, землетрясений и т. д.).

¹ URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/> (дата обращения: 19.04.2023).

Результаты наблюдений

При цифровой фильтрации вариаций геомагнитного поля выбраны периоды в диапазоне от 2 до 30 мин. Для сравнения поведения геомагнитного поля в день пролета с невозмущенным состоянием геомагнитного поля были выбраны спокойные дни 7–8 марта 2014 г. Рисунки 4–6 показывают вариации D -, H - и Z -компонент до и после взрыва Виллойского метеора 4–5 марта 2014 г. (сплошная линия) и вариации D -, H - и Z -компонент в это же время в магнитоспокойные дни 7–8 марта 2014 г. (штриховая линия). На рисунках 4–6 видно, что после взрыва в вариациях 4–5 марта появились изменения, которые отличаются от хода вариаций в спокойное время. Эти изменения можно отнести к изменениям, вызванным появлением возмущений от взрыва метеора.

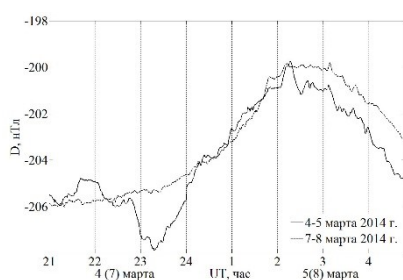


Рис. 4. D -компонента во время взрыва метеора 4–5 марта 2014 г. и в контрольные дни 7–8 марта 2014 г.

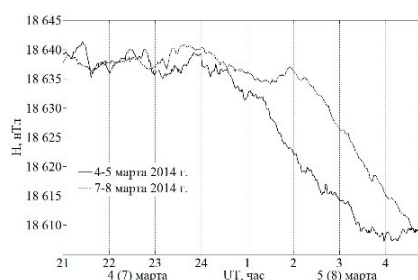


Рис. 5. H -компонента во время взрыва метеора 4–5 марта 2014 г. и в контрольные дни 7–8 марта 2014 г.

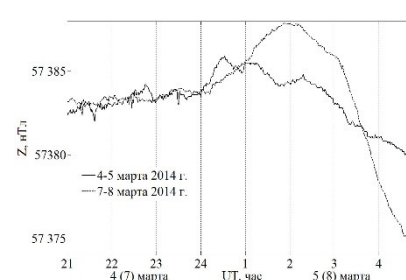


Рис. 6. Z -компонента во время взрыва метеора 4–5 марта 2014 г. и в контрольные дни 7–8 марта 2014 г.

D -компонента

На рисунке 7 (средний рисунок) показано поведение D -компоненты геомагнитного поля. Верхний рис. 7 показывает изменение отфильтрованной D -компоненты, а нижний — ее вейвлет-спектр. Время взрыва метеора отмечено на верхних рисунках вертикальной линией.

На рисунках можно выделить три группы волновых возмущений, появившихся после взрыва Виллойского метеора. Первая группа возмущений проявилась в районе магнитной обсерватории практически сразу после взрыва метеора. Ее общая продолжительность была около 1 ч, до 22:30 UT. Вторая группа возмущений началась в 23:00 UT и продолжалась чуть более 2 ч. Третья группа возмущений появилась в 02:10 UT. Продолжительность этого магнитного возмущения было около 2,5 ч. Изменение D -компоненты по величине в первом возмущении было около $\pm 0,2$ нТл, во второй и третьей группе — $\pm 0,4$ нТл.

Для рассмотренных групп возмущений были рассчитаны временные зависимости функции спектральной плотности мощности (при этом выполнялся переход от частоты к периоду колебаний). Характер волновых возмущений изменяется после взрыва метеора, они заметно выше фоновых. На рисунке 8 приведены временные спектры рассмотренных групп возмущений. Первая группа возмущений (непрерывная линия) имеет максимум, равный 23 мин, второй, более слабый максимум, имеет период около 15 мин. Вторая группа (штриховая линия) имеет несколько максимумов. Наибольший максимум имеет период 25 мин, более слабые возмущения имеют периоды 14, 16 и 18 мин. Третье возмущение (точечная линия) является наиболее мощным, максимальный период возмущения имеет период 26 мин, более слабые — 13, 17 и 21 мин.

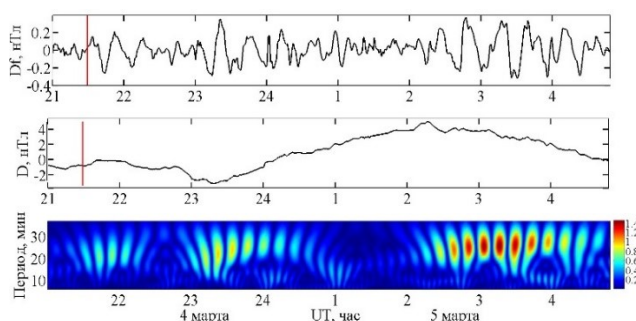


Рис. 7. D -компонента (в центре), отфильтрованная D -компонента (вверху) и ее вейвлет-спектр (внизу)

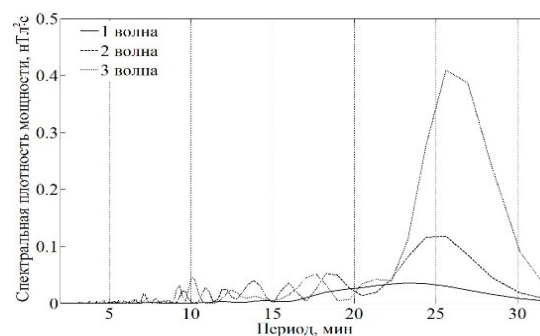


Рис. 8. Спектр приходящих волн

H-компонента

На рисунке 9 показано поведение *H*-компоненты (средний рисунок), отфильтрованной *H*-компоненты (вверху) и вейвлет-спектр отфильтрованной *H*-компоненты (внизу). Поведение *H*-компоненты не показывает такого четкого разделения на три группы, как в *D*-компоненте, поэтому спектр вариаций геомагнитного поля находился для *H*-компоненты в тех же временных периодах, что и для *D*-компоненты. На рисунке 10 представлены спектры трех групп возмущений *H*-компоненты.

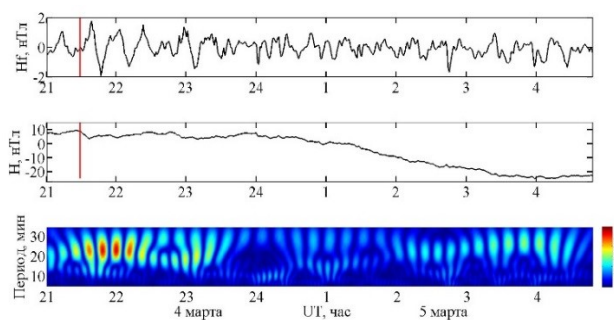


Рис. 9. *H*-компонента (в центре), отфильтрованная *H*-компонента (вверху) и ее вейвлет-спектр (внизу)

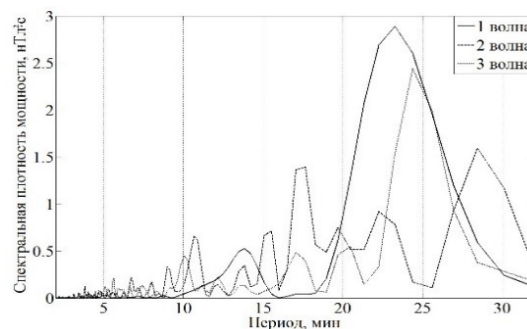


Рис. 10. Спектр приходящих волн

Наиболее четко заметен приход первой группы возмущений (сплошная линия). В *H*-компоненте максимум волновых возмущений имеет период 23 мин. Второй, более слабый максимум, имеет период 14 мин. Как и в первой группе возмущений *D*-компоненты, спектр гладкий, отсутствуют заметные периоды меньше 10 мин. Вторая группа возмущений (штриховая линия) имеет достаточно широкий спектр волновых возмущений: наибольший имеет период 28 мин, остальные более слабые — 11, 15, 17, 20 и 23 мин. Третья группа (точечная линия) имеет максимум на 25 мин и небольшие максимумы на 17 и 20 мин.

Z-компонента

На рисунке 11 показано поведение *Z*-компоненты (средний рисунок), отфильтрованной *Z*-компоненты (вверху) и вейвлет-спектр отфильтрованной *Z*-компоненты (внизу). Спектр вариаций геомагнитного поля находился для *Z*-компоненты в тех же временных периодах, что и для *D*-компоненты. На рисунке 12 представлены спектры трех групп возмущений *Z*-компоненты.

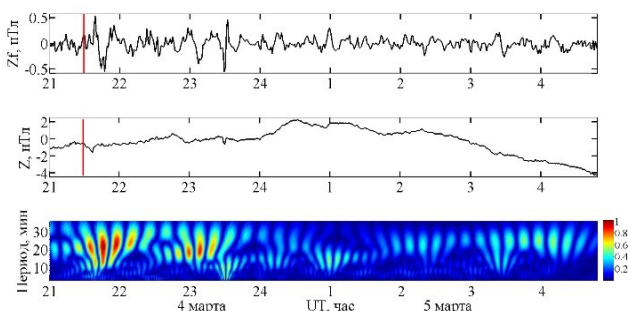


Рис. 11. *Z*-компонента (в центре), отфильтрованная *Z*-компонента (вверху) и ее вейвлет-спектр (внизу)

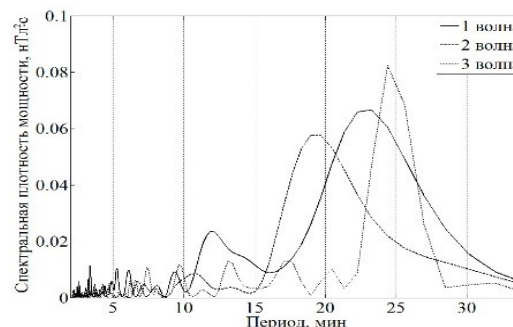


Рис. 12. Спектр приходящих волн

Наиболее явно заметен приход первой группы возмущений (сплошная линия). Максимум ее волновых возмущений имеет период 23 мин, второй, более слабый максимум, имеет период 12 мин. Вторая группа возмущений (штриховая линия) имеет наибольший период 19 мин и более слабый — 11 мин. Третья группа (точечная линия) имеет максимум на 25 мин и небольшие максимумы на 10, 13, 17 и 20 мин.

Саяногорский метеор

Характеристики метеора

По сообщению оперативного штаба Министерства по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям по г. Саяногорску (Республика Хакасия) метеор взорвался 6 декабря 2016 г. в 11:37 UT в районе между поселками Богословка, Сизой и Черемушки (52,9° с. ш., 91,4° в. д.). Вспышка от взрыва метеора была такой силы, что ее видели жители г. Абакана (столица Хакасии), расположенного в 80 км от г. Саяногорска. Расстояние между местом взрыва метеора и геомагнитной обсерваторией «Иркутск» — около 870 км.

Геофизическая обстановка

Согласно данным Мирового центра данных в Киото, в момент взрыва геомагнитная обстановка была спокойной. В таблице 2 приведены значения трехчасового планетарного геомагнитного индекса Кр во время взрыва и в контрольный день, в верхней строчке таблицы указано всемирное время.

Таблица 2

Значения планетарного геомагнитного индекса Кр

Дата	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24	ΣКр
04.12.2016	0	1–	0	0+	0	0	0	0+	1+
06.12.2016	0+	0+	1	2	3+	2	1+	2+	13–

Во время наблюдений метеора также не было найдено других возможных источников возмущений в геомагнитном поле.

Результаты наблюдений

На рисунках 13–15 показано поведения компонент геомагнитного поля в контрольный день 4 декабря 2016 г. (спокойный геомагнитный день) и в день взрыва метеора 6 декабря 2016 г. Вертикальной линией отмечено время взрыва метеора. Видно, что после взрыва метеора в магнитном поле произошли заметные изменения.

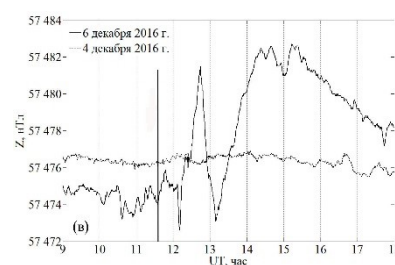
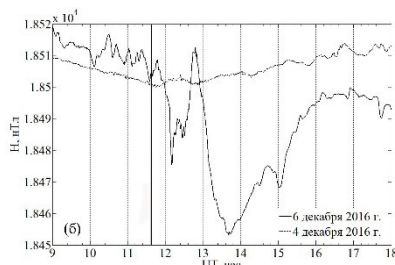
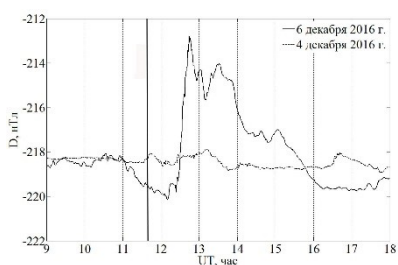


Рис. 13. D-компонента в контрольный день 4 декабря 2016 г. (штриховая линия) и в день взрыва метеора 6 декабря 2016 г. (сплошная линия)

Рис. 14. H-компонента в контрольный день 4 декабря 2016 г. (штриховая линия) и в день взрыва метеора 6 декабря 2016 г. (сплошная линия)

Рис. 15. Z-компонента в контрольный день 4 декабря 2016 г. (штриховая линия) и в день взрыва метеора 6 декабря 2016 г. (сплошная линия)

D-компонента

В отличие от взрыва Виллойского метеора, после взрыва метеора в Хакасии в D-компоненте наблюдался приход группы волн, которые не удается четко разделить. В 12:10 UT (рис. 16 и 17) стали видны первые слабые волновые проявления периодом около 20 мин. Скорость распространения этого возмущения от взрыва метеора до магнитной станции «Иркутск» — около 440 м/с. В 13:00 UT произошло существенное усиление волновой активности за счет появления импульсоподобного сигнала. Его скорость прихода можно оценить в 180 м/с. При этом спектр возмущения расширился, появилась волна с периодом 24 мин и более слабые волны с периодами 14 и 16 мин. После 13:30 UT волны с более мелкими периодами исчезли, а само возмущение продолжалось до 14:15 UT. Продолжительность всего явления была около 2 ч.

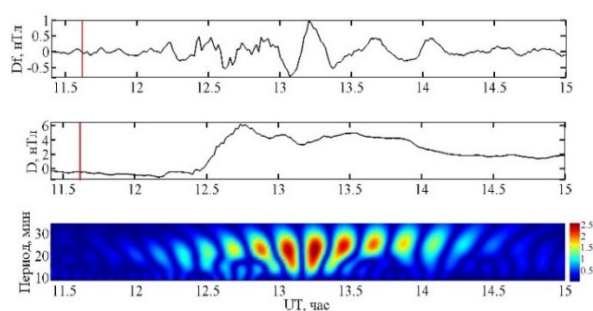


Рис. 16. *D*-компонента (в центре), отфильтрованная *D*-компонента (вверху) и ее вейвлет-спектр (внизу)

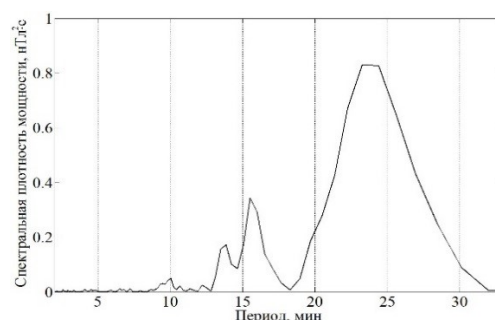


Рис. 17. Спектр приходящих волн

H-компонента

В *H*-компоненте можно отметить также ее резкое изменение в 12:10 UT (рис. 18). В спектре (рис. 19) это соответствует наличию волн 8–10, 14 и 16 мин. Скорость распространения возмущения от взрыва метеора до магнитной станции «Иркутск» — около 440 м/с. Следующая группа возмущений пришла в 12:20 UT. Периоды колебаний пришедшего возмущения — 20, 24 и 28 мин. Скорость распространения этой группы — приблизительно 340 м/с. Эти скорости 340 и 440 м/с соответствуют скоростям прихода ВГВ, которые сгенерированы в месте взрыва метеора.

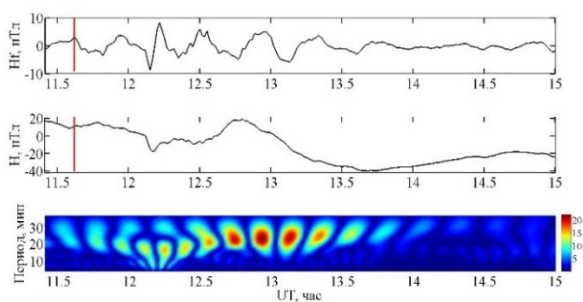


Рис. 18. *H*-компонента (в центре), отфильтрованная *H*-компонента (вверху) и ее вейвлет-спектр (внизу)

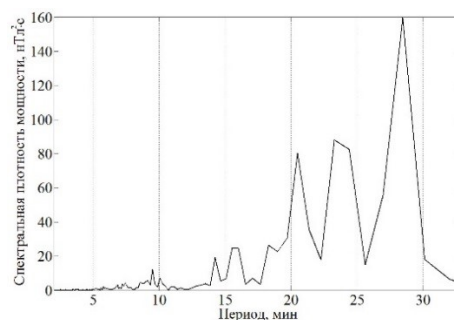


Рис. 19. Спектр приходящих волн

Z-компонента

В *Z*-компоненте ее резкое изменение также было в 12:10 UT (рис. 20). В спектре (рис. 21) это соответствует наличию волн 8–10, 13 и 16 мин. Время распространения возмущения от взрыва метеора до магнитной станции «Иркутск» — около 440 м/с. Следующая группа возмущений пришла в 12:20 UT. Спектр колебаний пришедшего возмущения — 20, 24 и 28 мин. Скорость распространения этой группы волн — приблизительно 340 м/с. Эти скорости 340 и 440 м/с соответствуют скоростям прихода ВГВ, которые пришли от места взрыва метеора. Поведение *Z*-компоненты во многом сходно с поведением *H*-компоненты.

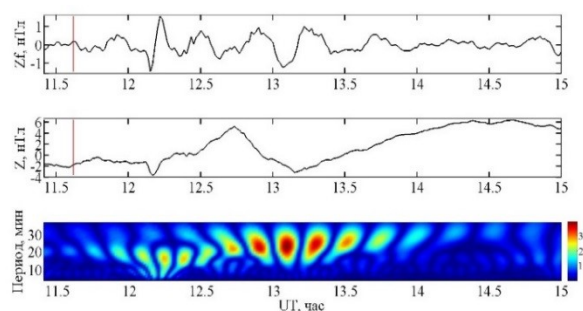


Рис. 20. *Z*-компонента (в центре), отфильтрованная *Z*-компонента (вверху) и ее вейвлет-спектр (внизу)

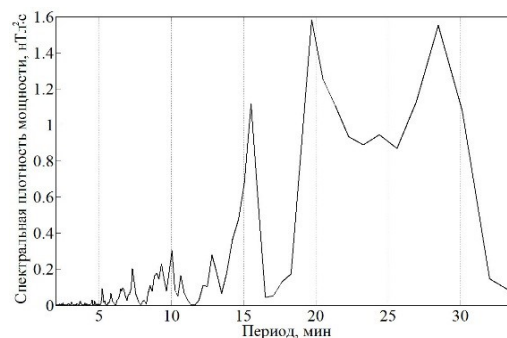


Рис. 21. Спектр приходящих волн

Обсуждение

Вилуйский метеор. Точное время взрыва метеора определено с ошибкой не более чем 1 мин, таким образом, скорость распространения первой группы возмущений можно оценить, полагая, что резкое уменьшение отфильтрованных D -, H -, Z -компонент после взрыва метеора является началом прихода магнитного возмущения в район наблюдения магнитной обсерватории «Иркутск». Оно началось приблизительно в 21:34 UT через 5 мин после взрыва.

Первые волновые проявления в геомагнитном поле, в основном H - и Z -компонентах, могут быть связаны с реакцией магнитного поля не на взрыв, а на появление баллистической ударной волны (БУВ) при входе метеороида в более плотные слои атмосферы (Савченко, 1975). Скорости движения метеоров существенно больше скоростей звука, поэтому для больших по размерам метеоров сверхзвуковое движение в достаточно плотной атмосфере сопровождается появлением головной ударной волны, переходящей по потоку в отошедшую ударную акустическую волну (УАВ). В месте образования ударных волн их амплитуда значительна прежде всего из-за скачка давления. Скорость распространения таких волн может значительно превышать скорость звука на ионосферных высотах. При прохождении ударной волны через ионосферу образуется магнитогидродинамическая ударная волна (МГД УВ), которая, в свою очередь, усиливает магнитное поле при прохождении через магнитоактивную плазму (Ландау, Лившиц, 2016). Отметим, что ударная волна является источником акустико-гравитационных волн (АГВ) и медленных магнитогидродинамических (МГД)-волн, которые затем также появляются в районе наблюдения. Согласно расчетам Черногора (Черногор, 2009, 2011), для высот 150 и 250 км возмущения с периодами больше 10 мин могут переноситься с помощью медленных МГД-волн на расстояния более 1 тыс. км. Для высот F -области, по оценкам Черногора (Черногор, 2009), скорость распространения медленных МГД-волн может достигать десятков километров в секунду. Таким образом, полученная скорость распространения возмущения может принадлежать медленным МГД-волнам, распространяющимся от места взрыва на высотах F -области. Приход медленной МГД-волны в район наблюдения может вызвать появление отклика геомагнитного поля на эту приходящую волну.

Вторая группа волн в D -, H -, Z -компонентах пришла через 91 мин после взрыва. Скорость прихода этого возмущения была около 315 м/с. Она соответствует скоростям распространения внутренних гравитационных волн (ВГВ) (Голицын и др., 1977). Судя по характеру изменения магнитного поля и широкому вейвлет-спектру в начальный период пришедшей второй группы с 23:00 до 23:30 UT, ее можно квалифицировать как приход сначала ударной волны, а затем инфразвуковых волн.

Третья группа возмущений наиболее сильно проявилась в D -компоненте, она пришла в 2:06 UT 5 марта. Скорость ее прихода равна приблизительно 100 м/с. В области низких частот (при частотах существенно ниже гирочастоты ионов) в нижней ионосфере могут возбуждаться и распространяться три ветви МГД-волн (Северный, 1954): альвеновская, быстрая и медленная. Расчетные значения горизонтальных фазовых скоростей медленной МГД-волны для параметров среды, найденных с помощью модели MSIS-E-90, на высотах 110–130 км для случая взрыва Челябинского суперболида 15 февраля 2013 г. в 03:20 UT были равны $v_{\text{фм}} = 100\text{--}160$ м/с (Поведение полярной ионосферы..., 2014). Первая цифра соответствует значениям скорости на высоте 110 км. Если полагать, что возмущения от взрыва метеорита распространяются по ионосфере вдоль дуги большого круга, то расчетная скорость их движения на высоте 110 км будет равна приблизительно 100 м/с. В случае взрыва Вилуйского метеора модельные условия распространения возмущения близки к рассмотренным условиям во время взрыва Челябинского суперболида. Поэтому можно предположить, что удовлетворительное соответствие между расчетной скоростью медленных МГД-волн и скоростью, полученной по вариациям геомагнитного поля, свидетельствует в пользу термосферного распространения возмущения от взрыва Вилуйского метеора. Разные скорости распространения медленных МГД-волн (первой и третьей группы возмущений) могут быть объяснены различными каналами распространения.

Основными механизмами появления периодических вариаций в геомагнитном поле могут быть непосредственное воздействие медленных МГД-волн на магнитоактивную плазму и модуляция ионосферных параметров, прежде всего ионосферных токов в E -области ионосферы, движением нейтральной компоненты в поле приходящих ударных и акустико-гравитационных волн.

Полет *Саяногорского метеора* и его разрушение оказали более сильное воздействие на геомагнитное поле. Первая и вторая группы возмущений пришли около 12:10 и 12:20 UT со скоростью 440 и 340 м/с соответственно. Эффекты в геомагнитном поле могут быть связаны с прохождением через ионосферу ударной волны (УВ), которая образовалась при взрыве метеора (Иванов, 1964). Судя по резкому изменению *H*- и *Z*-компонент геомагнитного поля во время прихода первой группы, они могут быть вызваны ударной волной. При своем движении в атмосфере ударные волны превращаются в слабые ударные волны, акустические и акустико-гравитационные волны и могут распространяться на большие расстояния. Они могут быть причиной появления второй группы волновых возмущений в 12:20 UT. В *H*- и *Z*-компонентах они имеют волнообразный вид, зато в *D*-компоненте в 13:00 UT они проявляются в виде резкого изменения величины компоненты, что соответствует по виду появлению ударной волны. В *H*- и *Z*-компонентах в это время эти изменения проявились в слабой степени.

Из рисунков спектров для 2–35 мин (рис. 7–19) видно, что в геомагнитном поле колебания с большим периодом имеют большую спектральную плотность мощности. Можно выделить три области: 2–10, 10–20 и 15–30 мин, имеющие разные уровни плотности мощности. Спектры колебаний от 2 до 10 мин показывают, что колебания с такими периодами практически отсутствуют в спектре вариаций геомагнитного поля. Поскольку диапазон чисто акустических волн меньше 6–10 мин (то есть меньше частоты собственных колебаний атмосферы или частоты Бранта – Вайсяля), то это означает, что колебания, имеющие только акустическую моду, не оказали заметного воздействия на вариации геомагнитного поля. Заметные вариации геомагнитного поля проявляются в колебаниях с периодом больше 10 мин, то есть у волн, которые имеют гравитационную составляющую.

Заключение

Выполнен анализ вариаций геомагнитного поля во время пролета и разрушения Вилуйского и Саяногорского метеоров. Пролеты и взрывы этих метеоров вызвали изменения в геомагнитном поле.

После пролета и взрыва Вилуйского метеора были выделены три группы возмущений в геомагнитном поле, которые имели скорости приблизительно 5,7–9,6 км/с, 315 и 100 м/с. Первая группа возмущений может быть вызвана распространением медленных МГД-волн в *F*-области ионосферы при пролете метеора, вторая — внутренними гравитационными волнами, образованными при распространении УАГВ после взрыва метеора, третья — распространением медленных МГД-волн на высотах *E*-области. Пролет и взрыв Саяногорского метеора вызвал появление двух групп возмущений в геомагнитном поле, которые имели скорости 440 и 340 м/с. Первая группа возмущений может быть вызвана распространением УАГВ, вторая — внутренними гравитационными волнами, образованными при взрыве метеора и распространении УАГВ.

Волновые проявления в геомагнитном поле могут быть вызваны воздействием медленных МГД-волн на магнитоактивную плазму и модуляцией ионосферных параметров, прежде всего ионосферных токов в *E*-области ионосферы, движением нейтральной компоненты в поле приходящих ударных и внутренних гравитационных волн.

Заметные вариации геомагнитного поля проявляются в колебаниях с периодом больше 10 мин, то есть у волн, которые имеют гравитационную составляющую.

Список источников

1. Бронштэн В. А. Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.
2. Бронштэн В. А. Магнитный эффект Тунгусского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42, № 6, С. 854–856.
3. Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду / под общ. ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, М. В. Сильникова. М.: Геос, 2016. 795 с.
4. Голицын Г. С., Григорьев Г. И., Докучаев В. П. Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13. С. 926–935.
5. Иванов К. Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита // Метеоритика. 1961. Вып. 21. С. 46–48.
6. Иванов К. Г. Геомагнитный эффект Тунгусского падения // Метеоритика. 1964. Вып. 24. С. 141–151.
7. Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчинова. Институт динамики геосфер РАН. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. 310 с.
8. Ковалев А. Т., Немчинов И. В., Шувалов В. В. Ионосферные и магнитосферные возмущения в результате падения небольших комет и астероидов // Астрономический вестник. 2006. Т. 40, № 1. С. 65–76.

9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Курс теоретической физики. Т. 8. М.: Физматлит, 2016. 656 с.
10. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 300 с.
11. О возможной геоэффективности пролета Челябинского метеороида в магнитном поле Земли / Р. А. Рахматулин [и др.] // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 24. С. 64–69.
12. О геомагнитном эффекте взрыва Тунгусского метеорита / Плеханов Г. Ф. [и др.] // Изв. вузов. Физика. 1960. № 2. С. 236–237.
13. Поведение полярной ионосферы после взрыва Челябинского метеорита / В. Д. Терещенко [и др.] // Распространение радиоволн: труды XXIV Всероссийской конференции. Иркутск, 2014. Т. II. С. 5–8.
14. Рахматулин Р. А. Аналогии в поведении магнитного поля Земли при падении Тунгусского и Челябинского болидов // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2019. Vol. 10, Iss. 3. P. 687–696.
15. Савченко Ю. Н. Геомагнитные возмущения, вызываемые ударными волнами крупных метеоритных тел. I. // Геомагнетизм и аэрномия. 1975. Т. 15, № 6. С. 1047–1053.
16. Северный А. Б. О магнитогидродинамических явлениях у поверхности Солнца // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. 1954. Т. 11. С. 129–151.
17. Спивак А. А., Рябова С. А. Возмущения геомагнитного поля при падении Липецкого (21.06.2018 г.) и Челябинского (15.02.2013 г.) метеоритов // Доклады академии наук. 2019. Т. 485, № 1. С. 361–365.
18. Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. 386 с.
19. Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Геомагнетизм и аэрномия. 2011. Т. 51, № 1. С. 119–132.
20. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле // Геомагнетизм и аэрномия. 2014. Т. 54, № 5. С. 658–669. DOI 10.1134/S001679321405003X.
21. Черногор Л. Ф. Эффекты Липецкого метеороида в геомагнитном поле // Геомагнетизм и аэрномия. 2020. Т. 60, № 3. С. 375–392. DOI 10.31857/S0016794020030037.
22. Шайдуров В. В. Магнитные эффекты Тунгусских событий 1908 года // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 3. С. 624–631.
23. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л.: Ленингр. ун-т, 1972. 592 с.

References

1. Bronshten V. A. *Fizika meteornykh yavleniy* [Physics of the meteoric phenomena]. Moscow, Nauka Publ, 1981, 426 p. (In Russ.).
2. Bronshten V. A. Magnitniy effekt Tungusskogo meteorite [Magnetic effect of the Tunguska meteorite]. *Geomagnetism i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 2002, vol. 42, no. 6, pp. 854–856. (In Russ.).
3. *Vozdeystvie raketno-kosmicheskoy tekhniki na okruzhayushchuyu sredu* [Impact of the missile and space equipment on the environment]. Moscow, Geos Publ., 2016, 795 p. (In Russ.).
4. Golitsin G. S., Grigoriev G. S., Dokuchaev V. P. Izluchenie akustiko-gravitatsionnykh voln pri dvizhenii meteorov v atmosphere [Radiation of acoustic-gravity waves during the movement of meteors in the atmosphere]. *Izvestiya AN SSSR* [News of AS SSSR], 1977, vol. 13, pp. 926–935. (In Russ.).
5. Ivanov K. G. Geomagnitnye yavleniya, nabludavshiesya na Irkutskoy magnitnoi observatorii vsled za vzryvom Tungusskogo meteorite [Geomagnetic phenomena observed at the Irkutsk magnetic observatory following the explosion of the Tunguska meteorite]. *Meteoritika* [Meteoritica], 1961, is. 21, pp. 46–48. (In Russ.).
6. Ivanov K. G. Geomagnitniy effekt Tungusskogo padeniya [Geomagnetic effect of the Tunguska fall]. *Meteoritika* [Meteoritica], 1964, vol. 24, pp. 141–151. (In Russ.).
7. *Katastroficheskie vozdeystviya kosmicheskikh tel* [Catastrophic influences of space bodies]. Moscow, IKC “Akademkniga”, 2005, 310 p. (In Russ.).
8. Kovalev A. T., Nemchinov I. V., Shuvalov V. V. Ionosfernnye i magnitosfernnye vozmushcheniya v rezultate padeniya nebolshikh komet i asteroidov [Ionospheric and magnetospheric disturbances as a result of falling of small comets and asteroids]. *Astronomicheskii vestnik* [Astronomical Bulletin], 2006, vol. 40, no. 1, pp. 65–76. (In Russ.).
9. Landau L. D., Livshits E. M. *Kurs teoreticheskoy fiziki* [Course of theoretical physics]. Moscow, vol. 8, Physmatlit Publ., 2016, 656 p. (In Russ.).
10. Nishida A. *Geomagnitnyy diagnost magnitosfery* [Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere]. Moscow, 1980, 300 p.
11. Rakhmatulin R. A., Pashinin A. Yu., Lipko Yu. V., Homutov S. Yu., Babakhanov I. Yu. O vozmozhnoy geoeffektivnosti proleta Chelyabinskogo meteoroida v magnitnom pole Zemli [About possible geoefficiency of the flight of the Chelyabinsk meteoroid in the magnetic field of the Earth]. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics], 2013, vol. 24, pp. 64–69. (In Russ.).
12. Plekhanov G. F., Kovalevsky A. F., Zhuravlev V. K., Vasiliev N. V. O geomagnitnom effekte vzryva Tungusskogo meteorita [On the geomagnetic effect of the Tungus meteorite explosion]. *Izvestiya Vuzov. Physics* [Russian Physics Journal], 1960, vol. 2, pp. 236–237. (In Russ.).

13. Tereshchenko V. D., Tereshchenko V. A., Ogloblina O. F., Cherniakov S. M. Povedenie polyarnoi ionosfery posle vzryva Chelyabinskogo meteorite [Behavior of the polar ionosphere after the explosion of the Chelyabinsk meteorite]. *Trudy Dvadsat shestoi Vserossiyskoi konferentsii "Rasprostranenie radiovoln"* (g. Irkutsk, 2014 g.) [Proc. XXVI All-Russian conference "Propagation of radio waves"]. Irkutsk, 2014, vol. II, pp. 5–8. (In Russ.).
14. Rakhmatulin R. A. Analogii v povedenii magnitnogo polya Zemli pri padenii Tunguskogo i Chelyabinskogo bolidov [Similar features of the Earth's magnetic field components during fall of the Tunguska and Chelyabinsk bolides]. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2019, vol. 10, is. 3, pp. 687–696, doi 10.5800/GT-2019-10-3. (In Russ.).
15. Savchenko Yu. N. Geomagnitnye vozmushcheniya, vyzyvayemye udarnymi volnami krupnykh meteoritnykh tel [The geomagnetic disturbances caused by shock waves of large meteoric bodies]. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 1975, vol. 15, no. 6, pp. 1047–1053. (In Russ.).
16. Severnyj A. B. O magnitogidrodinamicheskikh yavleniyakh u poverkhnosti Solntsa [About the magnetohydrodynamic phenomena at the surface of the Sun]. *Izvestiya Krymskoi astrofizicheskoy observatorii* [News of the Crimea Astrophysical Observatory], 1954, vol. 11, pp. 129–151. (In Russ.).
17. Spivak A. A., Ryabova S. A. Vozmushcheniya geomagnitnogo polya pri padenii Lipetskogo (21.06.2018) i Chelyabinskogo (15.02.2013) meteoritov [Disturbances of the geomagnetic field during the falls of the Lipetsk (21.06.2018) and Chelyabinsk (15.02.2013) meteorites]. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Akademii Nauk], 2019, vol. 485, no. 1, pp. 361–365. (In Russ.).
18. Chernogor L. F. Radiofizicheskie i geomagnitnye efekty startov raket [Radio physical and geomagnetic effects of starts of rockets]. Kharkov, KHNU V. N. Karazina Publ., 2009, 386 p. (In Russ.).
19. Chernogor L. F. Kolebaniya geomagnitnogo polya, vyzvannie proletom Vitimskogo bolide 24 sentyabrya 2002 g. [Oscillations of the geomagnetic field caused by the flight of the Vitim bolide on September 24, 2002]. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 2011, vol. 51, no. 1, pp. 116–130, doi 10.1134/S0016793211010038. (In Russ.).
20. Chernogor L. F. Effekty Chelyabinskogo meteoroida v geomagnitnom pole [Effects of the Chelyabinsk meteoroid in the geomagnetic field]. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 2014, vol. 54, no. 5, pp. 613–624, doi 10.1134/S001679321405003X. (In Russ.).
21. Chernogor L. F. Effekty Lipetskogo meteoroida v geomagnitnom pole [Effects of the Lipetsk meteoroid in the geomagnetic field]. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 2020. vol. 60, no. 3, pp. 375–392, doi 10.31857/S0016794020030037. (In Russ.).
22. Shaydurov V. V. Magnitnye efekty Tungusskikh sobytii 1908 goda [The magnetic effects of the Tunguska events in 1908]. *Vestnik SibGAU* [Vestnik SibGAU], 2015, vol. 16, no. 3, pp. 624–631. (In Russ.).
23. Yanovskiy B. M. *Zemnoi magnetizm* [Terrestrial magnetism]. Leningrad, Leningrad University Publ., 1972, 592 p. (In Russ.).

Информация об авторе

С. М. Черняков — научный сотрудник.

Information about the author

S. M. Cherniakov — Researcher.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 17.04.2023; принята к публикации 03.05.2023.
The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 17.04.2023; accepted for publication 03.05.2023.