



<https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0435>

## SIMILAR FEATURES OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD COMPONENTS DURING FALL OF THE TUNGUSKA AND CHELYABINSK BOLIDES

R. A. Rakhmatulin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** A superbolide with an estimated mass of 13,000 tonnes exploded at an altitude of 22 km over the city of Chelyabinsk (Russia) at 03 hours 20 min. 33 sec. UTC on February 15, 2013. It is now known as the Chelyabinsk meteorite. Over the past 100 years after the fall of the Tunguska meteorite on June 30, 1908, this event was an entry of the second largest object from outer space into the Earth's atmosphere. In the literature describing the occurrence of magnetic effects during the fall and explosion of the Tunguska meteorite in the magnetosphere and atmosphere of the Earth on June 30, 1908, some researchers mentioned a change in variations in the Earth's magnetic field 80 minutes before the explosion itself. Similar features of the magnetic field components observed by the Irkutsk Magnetic Observatory are identified by the comparative analysis of the magnetic field variations during the falls of the Tunguska and Chelyabinsk space bodies through the magnetosphere.

**Key words:** meteorite; magnetosphere; magnetic field; magnetic variations; geomagnetic pulsations

Статья публикуется по материалам доклада, сделанного авторами на XII Российско-Монгольской международной конференции «Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона» (1–5 октября 2018 г., г. Иркутск)

### RESEARCH ARTICLE

**Received:** January 27, 2019

**Revised:** June 21, 2019

**Accepted:** July 2, 2019

**For citation:** Rakhmatulin R.A., 2019. Similar features of the Earth's magnetic field components during fall of the Tunguska and Chelyabinsk bolides. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (3), 687–696. doi:10.5800/GT-2019-10-3-0435.

# АНАЛОГИИ В ПОВЕДЕНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ПРИ ПАДЕНИИ ТУНГУССКОГО И ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДОВ

Р. А. Рахматулин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

**Аннотация:** 15 февраля 2013 г. в 03 ч 20 мин 33 с по мировому времени над Челябинском на высоте 22 км взорвался суперболид массой около 13 тыс. т, который впоследствии получил название «Челябинский метеорит». За прошедшие последние 100 лет после падения Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. это второе по величине вторжение небесного тела в атмосферу Земли. Анализ литературы, описывающей возникновение магнитных эффектов во время полета и взрыва Тунгусского метеорита в магнитосфере и атмосфере Земли 30 июня 1908 г., показал, что отдельные исследователи обнаружили изменение в вариациях магнитного поля Земли за 80 мин до самого взрыва. Сравнительный анализ поведения вариаций магнитного поля Земли в периоды пролетов Тунгусского и Челябинского болидов в магнитосфере Земли показал подобие в поведении некоторых компонент магнитного поля по наблюдениям в магнитной обсерватории «Иркутск».

**Ключевые слова:** метеорит; магнитосфера; магнитное поле; магнитные вариации; геомагнитные пульсации

## 1. ВВЕДЕНИЕ

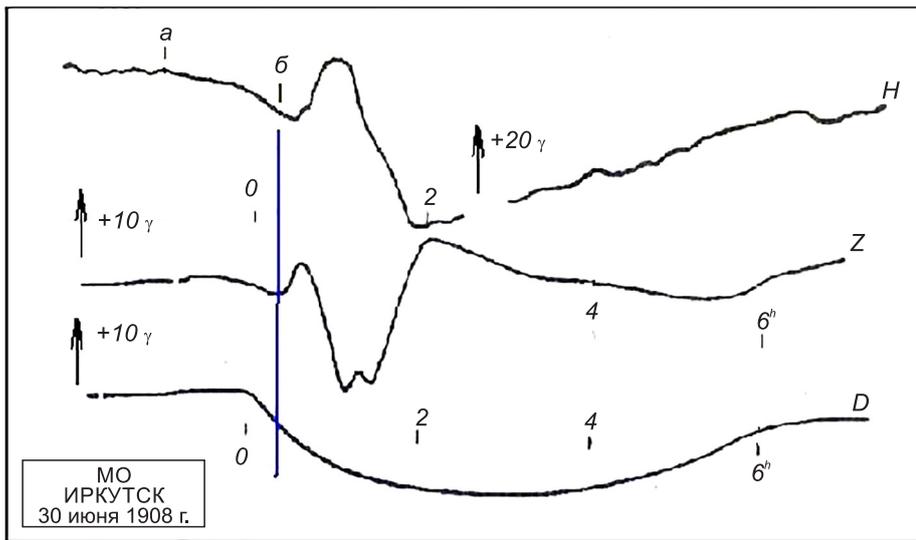
30 июня 1908 г. около семи часов утра по местному времени над территорией бассейна Енисея с юго-востока на северо-запад пролетел большой огненный шар. Полет закончился взрывом на высоте 7–10 км над незаселенным районом тайги. Ударная волна была зафиксирована обсерваториями по всему миру, в том числе в Западном полушарии. В Иркутской магнитометеорологической обсерватории были зафиксированы как сейсмическая волна, так и магнитные возмущения, источником которых был взрыв космического тела, вторгнувшегося в атмосферу Земли. Впоследствии вторжение этого космического «пришельца» получило название Тунгусского метеорита, Тунгусского болида, Тунгусского космического тела (ТКТ).

Первые работы по изучению вариаций магнитного поля Земли при падении ТКТ базировались на данных иркутских сейсмографов [Voznesensky, 1925] и Иркутской магнитной обсерватории «Зуй», расположенной недалеко от Иркутска, расстояние до места взрыва составляло около 1000 км [Ivanov, 1961, 1964].

Результаты обработки сейсмограмм Иркутской обсерватории показали, что взрыв ТКТ произошел в 7 ч 14.5±0.8 мин по местному времени (0 ч 14.5 мин по Гринвичу) [Voznesensky, 1925]. Аномалии в H-составляющей магнитного поля начались в 00:19:30, т.е. через 2 мин 18 с после взрыва [Ivanov, 1961, 1964]. При анализе возмущений магнитного поля после взрыва ТКТ необходимо было исключить возможность наложения естественных источников

на исследуемое явление. Для этих целей исследователи оптических эффектов от взрыва ТКТ [Vasiliev et al., 1965] разослали запросы в 28 магнитных обсерваторий, проводивших наблюдения в 1908 г., с просьбой предоставить магнитограммы за период 25 июня – 5 июля 1908 г. Семнадцать обсерваторий предоставили эти материалы в распоряжение ученых. Были проанализированы магнитограммы и цифровые материалы, полученные в обсерваториях, расположенных по всему земному шару, в таких пунктах как: Иркутск, Свердловск, Павловск, Тбилиси, Прага, Копенгаген, Эскадалемюир, Потсдам, Пикдю-Миди, Шамбон-ля-Форе, Коимбра, Кадикс, Гельван, Тананариве, Валенсия, Кодайканал, Гонолулу, Порто-Рико. Проведенный анализ [Vasiliev et al., 1965] показал, что в период с 25 июня по 5 июля магнитное поле Земли во всех этих пунктах было спокойным, за исключением Иркутска, где было зарегистрировано локальное возмущение, вызванное взрывом Тунгусского метеорита. Оно было подробно рассмотрено К.Г. Ивановым и рядом других авторов [Ivanov, 1961, 1962, 1964; Idlis, Karyagina, 1961; Obashev, 1961; Plekhanov et al., 1960, 1961].

Для выделения геомагнитного эффекта Тунгусского взрыва К.Г. Иванов [Ivanov, 1961, 1964] исключил из видимых изменений составляющих поля спокойную солнечно-суточную  $S_q$ -вариацию магнитного поля [Afanasieva, 1954], которая порой маскирует или «замазывает» исследуемое явление. Результаты такой процедуры представлены на рисунке 1, где изображены три компоненты магнитного поля Земли по данным Иркутской обсерватории в день падения Тунгусского космического тела.



**Рис. 1.** Магнитограмма магнитной обсерватории «Иркутск», полученная в день взрыва Тунгусского космического тела 30 июня 1908 г. Вертикальная линия – момент взрыва метеорита в атмосфере.

**Fig. 1.** Magnetogram recorded by the Irkutsk Magnetic Observatory on June 30, 1908 (Tunguska event). Vertical line – moment of the meteorite explosion in the atmosphere.

На данных, приведенных на рисунке 1, отчетливо наблюдается начало мощной магнитной бури после взрыва метеорита в атмосфере. Эти возмущения магнитного поля, вызванные Тунгусской катастрофой, описаны практически одновременно К.Г. Ивановым [Ivanov, 1961, 1962, 1964] и А.Ф. Ковалевским [Plekhanov et al., 1960] в 1960 г. В этих работах также отмечается локальность зарегистрированного эффекта. Но, в отличие от монографии [Vasiliev et al., 1965], здесь использовался ограниченный набор данных только российских магнитных обсерваторий (Свердловской, Павловской и Тбилисской) [Ivanov, 1961, 1962, 1964].

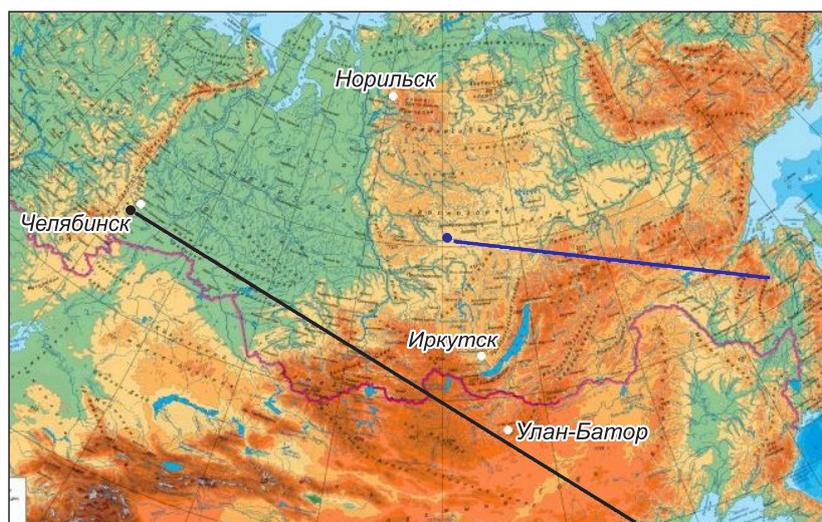
Для объяснения физической природы эффектов в магнитном поле было предложено несколько механизмов, предполагающих, что причиной послужила взрывная волна, пришедшая в ионосферу [Ivanov, 1962]. Основанием для такого допущения был «эффект запаздывания», поскольку магнитная аномалия проявилась с задержкой относительно момента взрыва. При этом время запаздывания примерно соответствовало интервалу, достаточно, чтобы взрывная волна могла пройти нужный путь до ионосферы.

Далее необходимо отметить, что многие специалисты-магнитологи сконцентрировали свои усилия на исследовании самой магнитной аномалии. И только в отдельных работах обращено внимание на незначительные изменения в Н-компоненте магнитного поля до начала взрыва (отрезок а–б на рисунке 1). К таким работам можно причислить исследование [Kucherov, 2002, 2008], где отмечено следующее (цитируем): «Геомагнитное возмущение, по мнению автора работ [Ivanov, 1961, 1962, 1964], обнаружившего эффект, началось в 0 час. 19.5 мин – с запаздыванием на 2.3 мин относительно начала взрыва (точка «б» на кривой горизон-

тальной составляющей магнитограммы Н). Большинство исследователей [Ivanov, 1964; Plekhanov et al., 1960; Kuznetsov, 2002, 2003; Zhuravlev, 1998] интерпретацию геомагнитного эффекта Тунгусского явления начинают именно с этой точки в рамках модели точечного взрыва. Однако участок «а–б» – ослабления напряженности магнитного поля Земли, которое начинается примерно за 80–85 мин до взрыва ТКТ (точка «а»), исследователями не принимается во внимание. Две другие составляющие магнитного поля – вертикальная составляющая – «Z» и склонение «D» – также начинают свои изменения заметно раньше момента взрыва ТКТ (рис. 1). За 80–85 минут до взрыва ТКТ находилось на расстоянии, соизмеримом с протяженностью магнитного поля Земли с солнечной стороны (~80 тыс. км). Таким образом, магнитографы Иркутской обсерватории зафиксировали как вторжение ТКТ в магнитное поле Земли (точка «а»), так и его воздействие на земное магнитное поле вплоть до момента взрыва тела (участок «а–б» на магнитограмме Иркутской обсерватории) [Kucherov, 2002, 2008]. Таким образом, имеющиеся в то время на вооружении магнитных обсерваторий магнитографы отметили изменение магнитного поля при вхождении Тунгусского болида в магнитосферу Земли.

## 2. ЧЕЛЯБИНСКИЙ МЕТЕОРОИД

15 февраля 2013 г. астероид диаметром около 19.8 м и массой порядка 13 тыс. т (по расчетам НАСА) вошел в атмосферу Земли на скорости около 18 км/с и в 03 ч 20 мин 33 с по мировому времени взорвался над Челябинском на высоте 22 км. Судя по продолжительности полета в плотных слоях



**Рис. 2.** Карта с траекториями пролетов Тунгусского (синий цвет) и Челябинского (черный цвет) болидов над поверхностью Земли.

**Fig. 2.** Map showing the trajectories of the Tunguska (blue) and Chelyabinsk (black) bolides over the Earth surface.

атмосферы – 32.5 с, вход в атмосферу произошел под очень острым углом [Yeomans, Chodas, 2013]. После этого произошел взрыв и небесное тело разрушилось. Разрушение представляло собой серию событий, сопровождавшихся распространением ударных волн. Общее количество высвободившейся энергии по различным оценкам составило от 200 до 500 килотонн в тротиловом эквиваленте. Это самое большое из известных небесных тел, падавших на Землю после Тунгусского метеорита в 1908 г. События такого масштаба происходят в среднем раз в 100 лет. К настоящему времени число научных публикаций, посвященных исследованию этого феномена, перевалило по скромным оценкам за несколько десятков. На рисунке 2 приводится карта с траекториями полета Тунгусского и Челябинского болидов на поверхности Земли.

Если предположить (как и в случае с Тунгусским небесным телом), что полет этого небесного тела был геоэффективен, то тогда полезный сигнал надо отслеживать после вторжения его в магнитосферу Земли и до взрыва в атмосфере. И естественно предположить, что ожидаемый сигнал в вариациях магнитного поля будет очень слабый и может быть обнаружен только на очень спокойном и невозмущенном магнитном фоне. Время нахождения болида в магнитном поле Земли при размерах подсолнечной части магнитосферы в 10–14 радиусов Земли (65000–90000 км) и скорости болида 18 км/с оценивается от 60 до 80 мин до момента взрыва [Berngardt et al., 2013].

В этой связи уместно будет отметить, что у нас уже был опыт работы в этом направлении. В работе [Lipko et al., 2016] мы проводили исследование

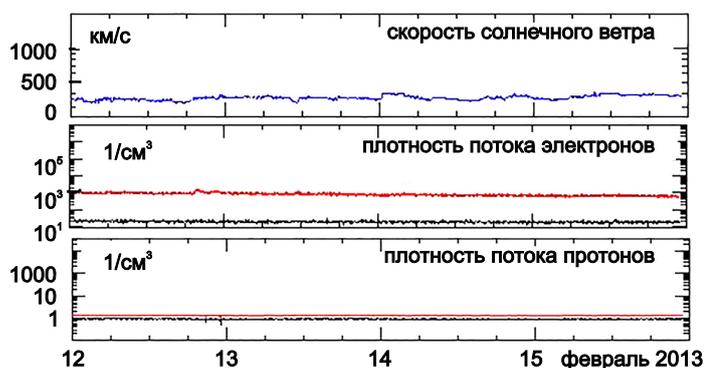
возможных эффектов в магнитном поле Земли от пролета над сибирскими обсерваториями грузового транспортного космического корабля «Прогресс» (после отстыковки его от Международной космической станции) с работающими тормозными двигателями. В работе [Lipko et al., 2016] установлено, что при определенных условиях в магнитосфере Земли в магнитном поле могут генерироваться высокочастотные колебания, стимулированные выбросом горячей плазмы от работающих двигателей «Прогресса».

В представленном исследовании мы рассмотрели вероятность появления и наблюдения возможных эффектов в магнитном поле Земли от пролета Челябинского космического тела в магнитосфере и плазмосфере и одновременно сопоставили обнаруженные эффекты с результатами более ранних аналогичных исследований, относящихся к ТКТ.

Как и в случае с Тунгусским небесным телом, необходимо провести анализ уровня возмущенности магнитного поля для исключения возможного влияния на исследуемый эффект естественных магнитных возмущений.

### 3. АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ МАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОЙ ГЕОЭФФЕКТИВНОСТИ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА

Со времени падения ТКТ современная геофизика существенно пополнилась магнитоизмерительной аппаратурой нового поколения, приборами и технологиями для оценки уровня возмущенности



**Рис. 3.** Параметры солнечного ветра (скорость солнечного ветра, плотность протонов и электронов в солнечном ветре) до и в день взрыва Челябинского болида (источник – <http://www.srl.caltech.edu>).

**Fig. 3.** Parameters of the solar wind (solar wind velocity; densities of protons and electrons in the solar wind) before and on the day of the Chelyabinsk event (<http://www.srl.caltech.edu>).

и общего состояния магнитосферы. Теперь имеется возможность проследить динамику активности магнитосферы начиная от образования активных областей на солнце до проявления результатов этих активизаций на орбите Земли. В связи с этим мы рассмотрели, какие условия в солнечном ветре и магнитном поле Земли предшествовали периоду вхождения Челябинского болида в магнитосферу и атмосферу Земли. На рисунке 3 приводятся параметры солнечного ветра в дни, предшествующие вторжению болида в магнитосферу Земли.

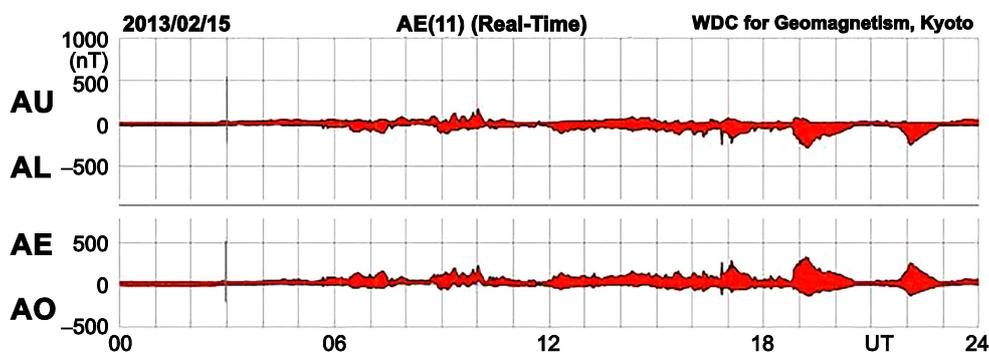
Анализ спутниковых данных, приведенных на рис. 3, показал, что в период времени, предшествующий вхождению болида в плазмосферу Земли вплоть до достижения им плотных слоев атмосферы, условия в солнечном ветре были очень спокойными.

Далее мы проанализировали состояние авроральной активности, так как в основном все магнитные возмущения начинаются в северных широтах. Для этого на рисунке 4 приводятся авроральные магнитные индексы. Анализ данных о вариациях магнитного поля по авроральным станциям также продемонстрировал, что время прохождения

болида через плазмосферу Земли приходится на очень магнитоспокойный период, о чем свидетельствуют данные авроральных AU, AL, AE и AO-индексов.

Таким образом, можно сделать вывод, что вторжение Челябинского болида в магнитосферу Земли произошло в очень магнитоспокойный период. В связи с этим далее мы проанализировали материалы наблюдений на магнитометрических обсерваториях ИСЗФ СО РАН, производящих непрерывный мониторинг параметров геомагнитного поля Земли в широком диапазоне периодов. Дополнительно мы использовали данные обсерватории «Арти», расположенной под Екатеринбургом недалеко от места падения Челябинского метеороида. Список станций с координатами и действующими на них геофизическими приборами приведен в таблице.

На рисунке 5 представлены результаты измерения вариаций магнитного поля Земли в обсерваториях, участвующих в эксперименте, в день вторжения Челябинского болида. В части рисунка 5, б, в, г, изображены Н-компоненты магнитограмм магнитных обсерваторий «Иркутск», «Арти», «Норильск», которые свидетельствуют об отсутствии явных



**Рис. 4.** Авроральные индексы возмущенности магнитного поля Земли в день взрыва Челябинского болида (источник – <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). Вертикальная линия – время взрыва болида.

**Fig. 4.** Auroral indices of the Earth's magnetic field perturbation on the day of the Chelyabinsk event (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). Vertical line – moment of the bolide explosion in the atmosphere.

**Координаты станций, материалы наблюдения которых используются в работе, и установленное на них геофизическое оборудование**

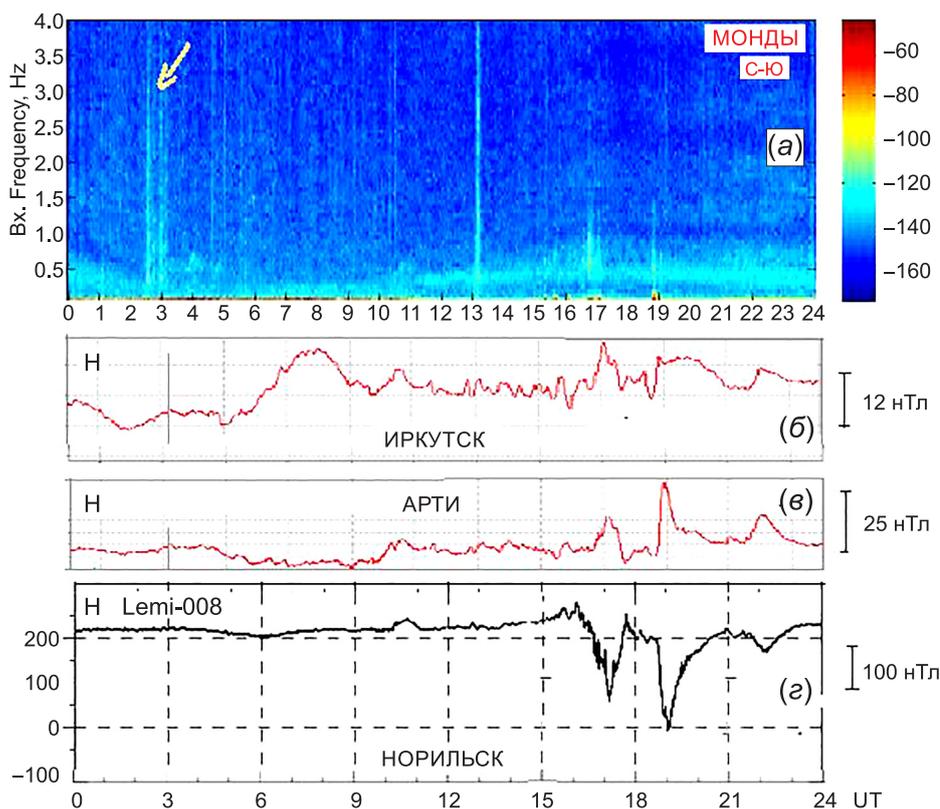
**Coordinates of the monitoring stations, and their geophysical equipment**

Обсерватория	Географические координаты		Геомагнитные координаты		Действующие приборы
	φ (град)	λ (град)	φ (град)	λ (град)	
Монды	51.40	100.50	48.20	175.20	Индукционный магнитометр. Геомагнитные пульсации 0–30 Гц
Норильск	69.30	88.20	64.20	160.40	Магнитовариационная станция. Длиннопериодные вариации 0–2 Гц Индукционный магнитометр. Геомагнитные пульсации 0–30 Гц
Арти	56.42	58.52	52.10	131.70	Магнитовариационная станция. Длиннопериодные вариации 0–2 Гц
Иркутск (Патроны)	52.46	104.04	48.20	175.20	Магнитовариационная станция. Длиннопериодные вариации 0–2 Гц

возмущений в длиннопериодных вариациях магнитного поля Земли в момент взрыва и после него.

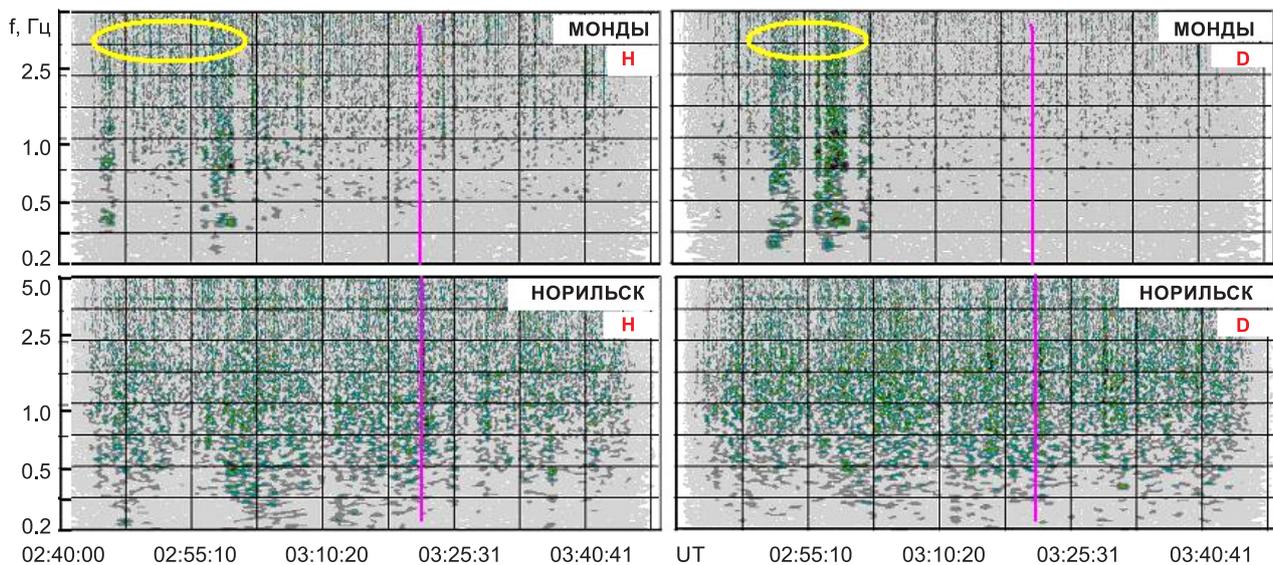
Однако на записях высокочувствительного индукционного магнитометра LEMI-30 до момента взрыва наблюдается широкополосный шумовой всплеск, хорошо видимый на спектрограмме obs. «Монды» (рис. 5, *a*, отмечено стрелкой). Здесь необходимо отметить, что наблюдения на индук-

ционном магнитометре в Петропавловске-Камчатском зарегистрировали аналогичный шумовой сигнал в это же время [Rakhmatulin et al., 2013]. Для выяснения более детальной картины этого события были выполнены оценки динамических спектров [Levshin et al., 1972] программой спектрально-временного анализа по данным станций «Монды» и «Норильск» (рис. 6).



**Рис. 5.** Вариации магнитного поля Земли в день падения Челябинского болида: (а) – динамический спектр геомагнитных пульсаций по данным среднеширотной станции Монды; (б), (в), (г) – Н-компоненты магнитограмм магнитных обсерваторий.

**Fig. 5.** Variations of the Earth's magnetic field on the day of the Chelyabinsk event: (a) – dynamic spectrum of geomagnetic pulsations according to the data of the mid-latitude Mondy Observatory; (b), (c), (d) – H-components of magnetograms of magnetic observatories.



**Рис. 6.** Динамические спектры вариаций горизонтальных составляющих магнитного поля Земли по данным обсерваторий «Монды», «Норильск» за период времени 02–04 UT 15.02.2013 г. (вычисленные по программе спектрально-временного анализа – СВАН). Вертикальной линией отмечен момент взрыва.

**Fig. 6.** Dynamic spectra of variations of the horizontal components of the Earth's magnetic field recorded by the Mondy and Norilsk Observatories for the time period of 02–04 UT on February 15, 2013 (calculations by the spectral-temporal analysis software). Vertical line – moment of the bolide explosion in the atmosphere.

Спектрально-временной анализ записи индукционного магнитометра в среднеширотной обсерватории «Монды», представленный на рисунке 6, показал наличие шумового всплеска в вариациях геомагнитного поля в диапазоне частот 0.2–5.0 Гц в интервале 02:45–02:58 UT, т.е. за 35 мин до взрыва метеороида. Момент взрыва метеороида обозначен на рисунке 6 вертикальной линией. Шумовые всплески геомагнитных пульсаций, выделенные желтым овалом, наблюдаются по обоим компонентам. По данным обсерватории «Норильск» не обнаружено сколько-нибудь заметного сигнала, который мог бы быть связан с эффектами пролета метеороида. Причиной возникновения шумового всплеска на среднеширотных обсерваториях, выделяемого на спокойном геомагнитном фоне, могут быть процессы, возникающие при взаимодействии метеороида с плазмосферой Земли. В спокойных условиях граница плазмосферы располагается на 5–6 радиусах Земли. Время, которое необходимо метеороиду, чтобы достичь поверхности Земли после входа в плазмосферу, может составлять от 40 до 20 мин при скорости 15–30 км/с. Эта оценка согласуется с наблюдением шумового всплеска за 35–40 минут до взрыва метеороида. Скорость распространения возмущения в магнитосфере составляет порядка 500–4000 км/с [Raspopov, Kleimenova, 1976] и дает лишь малые поправки к этой задержке. При этом практически не имеет большого значения траектория пролета метеороида в магнит-

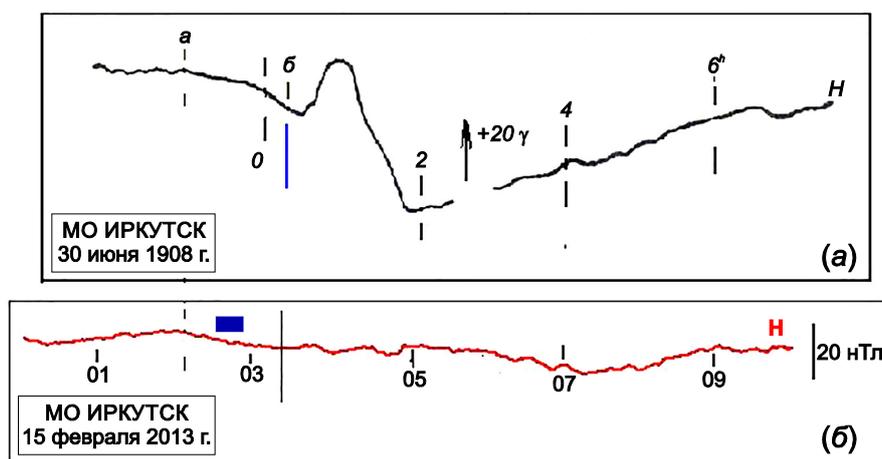
ном поле Земли. На расстоянии 6–8 радиусов Земли нет принципиальной разницы, как падал метеороид на поверхность Земли – под каким-либо углом либо вертикально.

Отсутствие эффекта в Норильске может быть обусловлено тем, что в этот момент времени проекция плазмопаузы на поверхность Земли находилась южнее Норильска.

Таким образом, можно предположить, что в расчетное время, определяемое входением болида в плазмосферу Земли, на очень спокойном магнитном фоне наблюдался шумовой всплеск геомагнитных пульсаций в диапазоне частот 0–4 Гц.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Далее для сопоставления длиннопериодных вариаций в течение полета метеороидов в магнитном поле Земли мы привели в единой временной и амплитудной шкале H-компоненты магнитограмм Иркутской обсерватории для Тунгусского и Челябинского болидов. Такой сравнительный анализ представлен на рисунке 7. Магнитограммы приведены с учетом лунно-суточной вариации (лунно-суточная Sq-вариация исключена). Обращает на себя внимание поведение H-компоненты обсерватории «Иркутск» за 70–80 мин до взрыва Челябинского метеороида – аналогично ТКТ наблюдается изменение (уменьшение) магнитного поля (для



**Рис. 7.** H-компоненты магнитограмм обс. «Иркутск» для Тунгусского космического тела и Челябинского метеороида. Вертикальной линией отмечено время взрывов небесных тел. Лунно-суточная Sq-вариация исключена из обеих магнитограмм. Синим прямоугольником отмечено наблюдение шумового всплеска в геомагнитных пульсациях, зарегистрированного индукционным магнитометром в обс. «Монды».

**Fig. 7.** H-components of magnetograms recorded by the Irkutsk Magnetic Observatory for the Tunguska space body and the Chelyabinsk meteoroid. Vertical line – moment of the bolide explosion in the atmosphere. The lunar diurnal Sq-variations are excluded from both magnetograms. Blue rectangle – noise surge in the geomagnetic pulsations recorded by an induction magnetometer at the Mondy Observatory.

Тунгусского метеорита этот момент обозначен точкой *a*). Таким образом, можно предположить, что вторжение ТКТ и Челябинского болида в магнитное поле Земли вызвало идентичные изменения в вариациях магнитного поля до момента их взрывов в атмосфере.

Остается только сожалеть, что парк магнитометрических приборов в то далекое время не имел в своем арсенале более высокочувствительных и высокочастотных приборов. Учитывая мощность Тунгусского взрыва, можно предположить, что спектр и амплитуды пульсаций магнитного поля, вызванные полетом ТКТ в магнитосфере Земли, были бы существенно выразительнее и многообразнее по сравнению с эффектами при падении Челябинского метеороида.

Теперь ответим на вопрос – почему мы рассмотрели магнитные данные обсерватории «Иркутск», а не «Арти», которая была намного ближе к месту взрыва Челябинского метеорита. Дело в том, что по массе ТКТ превосходит в десятки раз Челябинский болид, поэтому сила взрыва также была настолько мощнее, что взрывная волна вызвала генерацию электрических токов в ионосфере в ограниченном пространстве, что и привело к появлению локальной, но мощной магнитной бури.

Ввиду меньшей массы Челябинскому болиду не удалось вызвать столь масштабные возмущения. И на подлете к Челябинску он находился уже в атмосфере Земли. Но пролет в магнитосфере был близок к силовым линиям магнитного поля, проекции

которых на поверхность Земли соседствовали с регионом Иркутска (в магнитном отношении). Это хорошо видно из рисунка 2, на котором приведены траектории пролета метеороидов над поверхностью Земли. К тому же следует отметить, что, пролетая меридиан Иркутска, болид находился на высоте 4–6 тыс. км, то есть он находился непосредственно в плазмосфере Земли, где предположительно и стимулировал возбуждение высокочастотного шумового всплеска электромагнитного сигнала.

Таким образом, следует заключить, что вторжение в атмосферу Земли крупных космических тел может вызвать изменения в магнитном поле Земли при движении последних в магнитосфере и плазмосфере до момента взрыва в атмосфере. При этом возможна не только генерация длиннопериодных вариаций в компонентах магнитного поля, но и возбуждение геомагнитных пульсаций в различных диапазонах периодов.

## 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты работы получены с использованием оборудования магнитометрического комплекса Центра коллективного пользования «Ангара» (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>). Исследование выполнено в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 и при частичной поддержке РФФИ (проекты № 17-05-00492\_a, 18-55-52006\_МНТ\_a).

## 6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Afanasyeva V.I. (Ed.), 1954. The USSR Variable Magnetic Field. Reference Book. Hydrometeoizdat, Leningrad, 267 p. (in Russian) [Справочник по переменному магнитному полю СССР / Ред. В.И. Афанасьева. Л.: Гидрометеоздат, 1954. 267 с.].
- Berngardt O.I., Dobrynina A.A., Zherebtsov G.A., Mikhalev A.V., Perevalova N.P., Ratovskii K.G., Rakhmatulin R.A., San'kov V.A., Sorokina A.G., 2013. Geophysical phenomena accompanying the Chelyabinsk meteoroid impact. *Doklady Earth Sciences* 452 (1), 945–947. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13090080>.
- Ildis D.M., Karyagina Z.V., 1961. About the cometary nature of the Tunguska meteorite. *Meteoritika (Meteorite Studies)* 21, 32–43 (in Russian) [Идлис Г.М., Карягина З.В. О кометной природе Тунгусского метеорита // *Метеоритика*. 1961. Вып. 21. С. 32–43].
- Ivanov K.G., 1961. Geomagnetic phenomena observed by the Irkutsk Magnetic Observatory after the explosion of the Tunguska meteorite. *Meteoritika (Meteorite Studies)* 21, 46–48 (in Russian) [Иванов К.Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита // *Метеоритика*. 1961. Вып. 21. С. 46–48].
- Ivanov K.G., 1962. Geomagnetic effect of the Tunguska fall. *Geomagnetism and Aeronomy* 2 (1), 193–195 (in Russian) [Иванов К.Г. Геомагнитный эффект Тунгусского падения // *Геомагнетизм и аэрномия*. 1962. Т. 2. № 1. С. 193–195].
- Ivanov K.G., 1964. Geomagnetic effect of the Tunguska fall. *Meteoritika (Meteorite Studies)* 24, 141–151 (in Russian) [Иванов К.Г. Геомагнитный эффект Тунгусского падения // *Метеоритика*. 1964. Вып. 24. С. 141–151].
- Kuchеров V.I., 2002. On the explosion of the Tunguska Space Body in the Earth's Atmosphere. MGSU, Moscow, 20 p. VINITI 26.03.2002, No. 537 – B2002 (in Russian) [Кучеров В.И. О взрыве Тунгусского космического тела в атмосфере Земли. М.: МГСУ, 2002. 20 с. Деп. в ВИНТИ 26.03.2002, № 537 – B2002].
- Kuchеров V.I., 2008. On the explosion of the Tunguska space body in the Earth's atmosphere. *Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering* (4), 32–47 (in Russian) [Кучеров В.И. О взрыве Тунгусского космического тела в атмосфере Земли // *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2008. № 4. С. 32–47].
- Kuznetsov S.M., 2002. The magnetic effect of the Tunguska explosion. *Tungusky Bulletin of KSE* (15), 25–31 (in Russian) [Кузнецов С.М. Магнитный эффект Тунгусского взрыва // *Тунгусский вестник КСЭ*. 2002. № 15. С. 25–31].
- Kuznetsov S.M., 2003. Tunguska Meteorite. Novosibirsk, 157 p. (in Russian) [Кузнецов С.М. Тунгусский метеорит. Новосибирск, 2003. 157 с.].
- Levshin A.L., Pisarenko V.F., Pogrebinsky G.A., 1972. On a frequency-time analysis of oscillations. *Annales de Geophysique* 28 (2), 211–218.
- Lipko Yu.V., Pashinin A.Yu., Rakhmatulin R.A., Khakhinov V.V., 2016. Geomagnetic effects caused by rocket exhaust jets. *Solnechno-Zemnaya Fizika (Solar-Terrestrial Physics)* 2 (3), 33–40 (in Russian) [Липко Ю.В., Пашинин А.Ю., Рахматулин Р.А., Хахинов В.В. Эффекты в магнитном поле Земли от работы двигателей космического корабля // *Солнечно-земная физика*. 2016. Т. 2. № 3. С. 33–40]. <https://doi.org/10.12737/19634>.
- Obashev S.O., 1961. On the geomagnetic effect of the Tunguska meteorite. *Meteoritika (Meteorite Studies)* 21, 49–51 (in Russian) [Обашев С.О. О геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита // *Метеоритика*. 1961. Вып. 21. С. 49–51].
- Plekhanov G.F., Kovalevsky A.F., Zhuravlev V.K., Vasiliev N.V., 1960. On the geomagnetic effect of the explosion of the Tunguska meteorite. *Izvestiya Vuzov. Physics* (2), 236–237 (in Russian) [Плеханов Г.Ф., Ковалевский А.Ф., Журавлев В.К., Васильев Н.В. О геомагнитном эффекте взрыва Тунгусского метеорита // *Известия вузов. Физика*. 1960. № 2. С. 236–237].
- Plekhanov G.F., Kovalevsky A.F., Zhuravlev V.K., Vasiliev N.V., 1961. On the effect of the explosion of the Tunguska meteorite on the geomagnetic field. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 2 (6), 94–96 (in Russian) [Плеханов Г.Ф., Ковалевский А.Ф., Журавлев В.К., Васильев Н.В. О влиянии взрыва Тунгусского метеорита на геомагнитное поле // *Геология и геофизика*. 1961. Т. 2. № 6. С. 94–96].
- Rakhmatulin R.A., Pashinin A.Yu., Lipko Yu.V., Khomutov S.Yu., Babakhanov I.Yu., 2013. On the possible geoefficiency of Chelyabinsk meteoroid entering the Earth's magnetosphere. *Solnechno-Zemnaya Fizika (Solar-Terrestrial Physics)* (24), 64–69 (in Russian) [Рахматулин Р.А., Липко Ю.В., Хомутов С.Ю., Пашинин А.Ю., Бабаханов И.Ю. О возможной геоэффективности пролета Челябинского метеороида в магнитосфере Земли // *Солнечно-земная физика*. 2013. Вып. 24. С. 64–69].
- Raspopov O.M., Kleimenova N.G., 1976. Perturbations of Electromagnetic Field of the Earth. Part 2. Leningrad State University Publishing House, Leningrad, 270 p. (in Russian) [Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. Ч. 2. 270 с.].
- Vasiliev N.V., Zhuravlev V.K., Zhuravleva R.K., Kovalevsky A.F., Plekhanov G.F., 1965. Night Glowing Clouds and Optical Anomalies Associated with the fall of the Tunguska Meteorite. Nauka, Moscow, 258 p. (in Russian) [Васильев Н.В., Журавлев В.К., Журавлева Р.К., Ковалевский А.Ф., Плеханов Г.Ф. Ночные светящиеся облака и оптические аномалии, связанные с падением Тунгусского метеорита. М.: Наука, 1965. 258 с.].

Voznesensky A.V., 1925. Meteorite fall on June 30, 1908 in the upstream area of the Khatanga river. *Mirovedenie (World Studies)* 14 (1), 25–38 (in Russian) [Вознесенский А.В. Падение метеорита 30 июня 1908 г. в верховьях реки Хатанги // *Мироведение*. 1925. Т. 14. № 1. С. 25–38].

Yeomans D., Chodas P., 2013. Additional details on the large fireball event over Russia on Feb. 15, 2013. NASA/JPL Center for Near-Earth Object Studies (1 March 2013). Available from: [https://cneos.jpl.nasa.gov/news/fireball\\_130301.html](https://cneos.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html).

Zhuravlev V.K., 1998. The geomagnetic effect of the Tunguska explosion and a technogenic hypothesis. *Tungusky Bulletin of KSE*. No. 9 (in Russian) [Журавлёв В.К. Геомагнитный эффект Тунгусского взрыва и техногенная гипотеза // *Тунгусский вестник КСЭ*. 1998. № 9]. Available from: <http://tunguska.tsc.ru/ru/science/tv/9/8/>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ | INFORMATION ABOUT AUTHOR

---

### Равиль Анатольевич Рахматулин

докт. физ.-мат. наук, зав. обсерваторией

Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, Россия

✉ e-mail: [rav@iszf.irk.ru](mailto:rav@iszf.irk.ru)

🆔 <https://orcid.org/0000-0001-6168-5291>

### Ravil A. Rakhmatulin

Doctor of Physics and Mathematics, Head of Observatory

Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of RAS  
126A Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia