

СИНХРОННЫЕ ГЛОБАЛЬНО НАБЛЮДАЕМЫЕ УЛЬТРАКОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ИМПУЛЬСЫ

SYNCHRONOUS GLOBALLY OBSERVABLE ULTRASHORT-PERIOD PULSES

Р.А. Марчук

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, marchuk@mail.iszf.irk.ru*

А.С. Потапов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru*

В.В. Мишин

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vladm@iszf.irk.ru*

R.A. Marchuk

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, marchuk@mail.iszf.irk.ru*

A.S. Potapov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, potapov@iszf.irk.ru*

V.V. Mishin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vladm@iszf.irk.ru*

Аннотация. Исследованы свойства импульсных возмущений в геомагнитном поле, которые наблюдаются синхронно на сетях индукционных магнитометров Института солнечно-земной физики (ИСЗФ СО РАН) и канадских станций проекта CARISMA. Особенностью обнаруженных в работе импульсов является то, что их частотный диапазон ($f \sim 5\text{--}30$ Гц) лежит на стыке диапазонов двух классов электромагнитных колебаний: ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний ($f < 5\text{--}10$ Гц), или геомагнитных пульсаций, и сверхнизкочастотных (СНЧ) колебаний ($f \sim 30\text{--}300$ Гц) — и ранее был плохо изучен. Исследование представляет несомненный интерес с точки зрения физики процессов в сложной системе магнитосфера–ионосфера–атмосфера. Проведен морфологический анализ обнаруженных импульсов по данным станций ИСЗФ СО РАН, результатами которого явились статистические характеристики импульсов, построены их динамические спектры и выявлен ряд необычных свойств, отличающих их, с одной стороны, от импульсного типа геомагнитных пульсаций (иррегулярные пульсации типа Pi1B), а с другой — от более высокочастотных КНЧ и ОНЧ-сигналов (атмосфериков, свистов и т. д.). На основе полученных результатов выдвинуто предположение о том, что источником исследуемых импульсов могут служить электрические спрайты, вызываемые мощными грозами на средних и низких широтах. Используя результаты статьи [Wang et al., 2019] по пространственной и временной фиксации спрайтов в Северном Китае, мы подтвердили возникновение ультракороткопериодных импульсов вслед за возникновением спрайтов. Грозовая активность, как локальная, так и глобальная, считается одним из основных источников возбуждения ионосферного альвеновского резонатора (ИАР), играющего важную роль в осуществлении связи между ионосферой и магнитосферой. Возможно, что именно рассматриваемые в работе импульсные колебания являются одним из агентов, посредством которых энергия гроз передается в ИАР, включая тем самым в цепочку рассматриваемых связей и атмосферу.

Ключевые слова: геомагнитные пульсации, магнитосфера, диапазон УНЧ-КНЧ, красные спрайты, грозы, альвеновский резонатор.

Abstract. We have studied the properties of impulsive geomagnetic disturbances, which are observed synchronously at the network of induction magnetometers of the Institute of Solar-Terrestrial Physics (ISTP SB RAS) and Canadian stations of the CARISMA project [Mann, et al., 2008]. A feature of the pulses we detected is that their frequency range ($f \sim 5\text{--}30$ Hz) lies at the junction of the ranges of two known classes of electromagnetic oscillations: ultra-low-frequency (ULF) oscillations ($f < 5\text{--}10$ Hz), or geomagnetic pulsations, and extra-low frequency (ELF) oscillations ($f \sim 30\text{--}300$ Hz); therefore, the 5–30 Hz range is poorly studied. The work is of undoubted interest for physics of processes in the magnetosphere–ionosphere–atmosphere system. Morphological analysis of the pulses detected has been carried out using data from ISTP stations. As a result, we obtained statistical characteristics of the pulses, plotted their dynamic spectra, and determined a number of unusual properties that distinguish them, on the one hand, from geomagnetic pulsations of the pulsed type (irregular pulsations of the Pi1B type), and, on the other hand, from higher frequency ELF and VLF signals (atmospherics, whistlers, etc.). On the basis of the results, we have made an assumption that a source of the pulses under study can be electrical sprites caused by powerful thunderstorms at middle and low latitudes. Using the results obtained by Wang, et al. in 2019 on spatial and temporal fixation of sprites in North China, we have confirmed that ultra-short-period pulses occur following the emergence of sprites. Thunderstorm activity, both local and global, is considered to be one of the main sources of excitation of the ionospheric Alfvén resonator (IAR), which plays an important role in coupling the ionosphere and the magnetosphere. The pulsed oscillations of interest may be one of the agents through which the energy of thunderstorms is transferred to IAR, thereby including the atmosphere in the system considered.

Keywords: geomagnetic pulsations, magnetosphere, ULF-ELF frequency range, red sprites, lightning, Alfvén resonator.

ВВЕДЕНИЕ

Естественные электромагнитные излучения на границе ультранизкочастотного (УНЧ, 0.001–5 Гц) и крайне и сверхнизкочастотного (КНЧ/СНЧ, 3–300 Гц) диапазонов изучены недостаточно детально. Пока что в интервале частот 5–100 Гц наиболее известны излучения ионосферного альвеновского резонатора (ИАР) (см. обзор [Потапов и др., 2021]) с частотами гармоник от долей герца до 8–10 Гц и шумановского резонатора (земля–ионосфера) с фундаментальной частотой около 8 Гц. В то же время известно, что электрическая активность в атмосфере, связанная в первую очередь с грозами, генерирует достаточно мощные электромагнитные сигналы (сферики, атмосферерики, твики, свисты) [Гершман, Угаров, 1960]. Грозовая активность многообразна, и молниевые разряды разных типов генерируют импульсы разных частот, часть из которых попадает в указанный пограничный диапазон. Энергия этих импульсов питает волноводы и резонаторы, в том числе ИАР и резонатор Шумана. Особенно важна передача энергии гроз в ИАР, связывающий ионосферу с одной стороны с атмосферой, а с другой — с магнитосферой.

Грозы как источники энергии для излучения ИАР и шумановского резонатора рассматривались многими авторами [Belyaev et al., 1989; Fedorov et al., 2006; Nose et al., 2017]. Но какие грозы могут быть основным поставщиком энергии для возбуждения резонансных атмосферно-ионосферных структур? Этот вопрос требует прояснения.

В данной работе исследованы свойства импульсных возмущений в геомагнитном поле, которые наблюдаются синхронно на сетях индукционных магнитометров Института солнечно-земной физики (ИСЗФ СО РАН) и канадских станций проекта CARISMA [Mann et al., 2008], (рис. 1). По данным российских станций выполнен морфологический анализ обнаруженных импульсов, выдвинуто предположение, что их источником могут служить электрические спрайты [Wang et al., 2019], вызываемые мощными грозами на средних и низких широтах. Обсуждается возможность подпитки колебаний ИАР за счет энергии выявленных импульсов.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Мы использовали данные комбинированной сети, составленной из станций двух сетей. Расположение станций показано на рис. 1, зелеными кружками отмечены станции ИСЗФ, а красными треугольниками — станции проекта CARISMA. Географические координаты станций, модели установленных магнитометров и их частоты дискретизации приведены в табл. 1.

Характеристики индукционных магнитометров идентичны на всех станциях, различаются только частоты дискретизации. На рис. 2 приведены графики амплитудно-частотной характеристики и уровня шума индукционного магнитометра LEMI-30 на ст. «Монды» [http://lemisensors.com/wp-content/uploads/2018/03/LEMI-030_Datasheet.pdf]. Те же характеристики имеют магни-

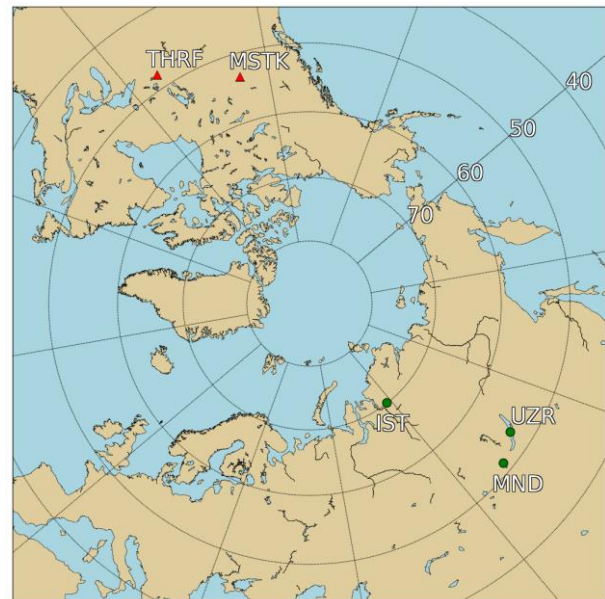


Рис. 1. Карта станций, данные которых использовались при анализе

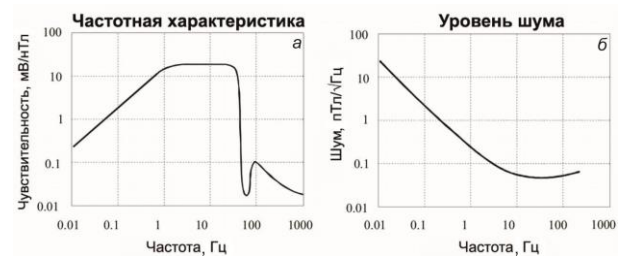


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика (а) и уровень шума (б) LEMI-30

тометры на станциях сети CARISMA, подробно с ними можно ознакомиться по адресу [<http://www.carisma.ca/background/carisma-induction-coils>] и в работе [Mann et al., 2008]. Магнитотеллурическая станция LEMI-418 на ст. «Узур» оснащена, кроме индукционных датчиков, феррозондом и датчиками теллурических токов модели LEMI-701. «Индукционная» часть станции LEMI-418 идентична магнитометру LEMI-30.

1.1. Ультракоткопериодные импульсы геомагнитного поля

В процессе работы с данными Комплексной магнитно-ионосферной обсерватории (КМИО) ИСЗФ СО РАН нами были обнаружены ультракоткопериодные импульсы (УКИ) геомагнитного поля, синхронно наблюдаемые на среднеширотных станциях «Монды», «Узур» и высокоширотной станции «Исток» (рис. 3).

Типичной формой обнаруженных импульсных возмущений является затухающая синусоида с одним интенсивным импульсом в начале (рис. 3, а). Реже наблюдается форма с несколькими парными импульсами (рис. 3, б). Пуг этих пульсаций может содержать до десяти колебаний.

Двойная амплитуда (размах) импульсов меняется в диапазоне $B \sim 0.001\text{--}0.1$ нТл. Частота возникновения обнаруженных пульсаций крайне высока, по нашим данным она достигала порядка нескольких десятков (от 30 до 60) импульсов за 5 мин, т. е.

Таблица 1

Координаты станций, данные которых использовались в работе

Обсерватория (станция)	Географические координаты		Частота дискретизации магнитометра, Гц	Модель магнитометра
	φ	λ		
Исток (IST)	70.0	88.0	64	LEM1-30
Монды (MND)	51.6	100.9	64	LEM1-30
Узур (UZR)	53.1	107.4	40	LEM1-418
Ministik Lake (MSTK)	53.4	247.0	100	LEM1-30
Thief River Falls (THRF)	48.0	263.6	100	LEM1-30

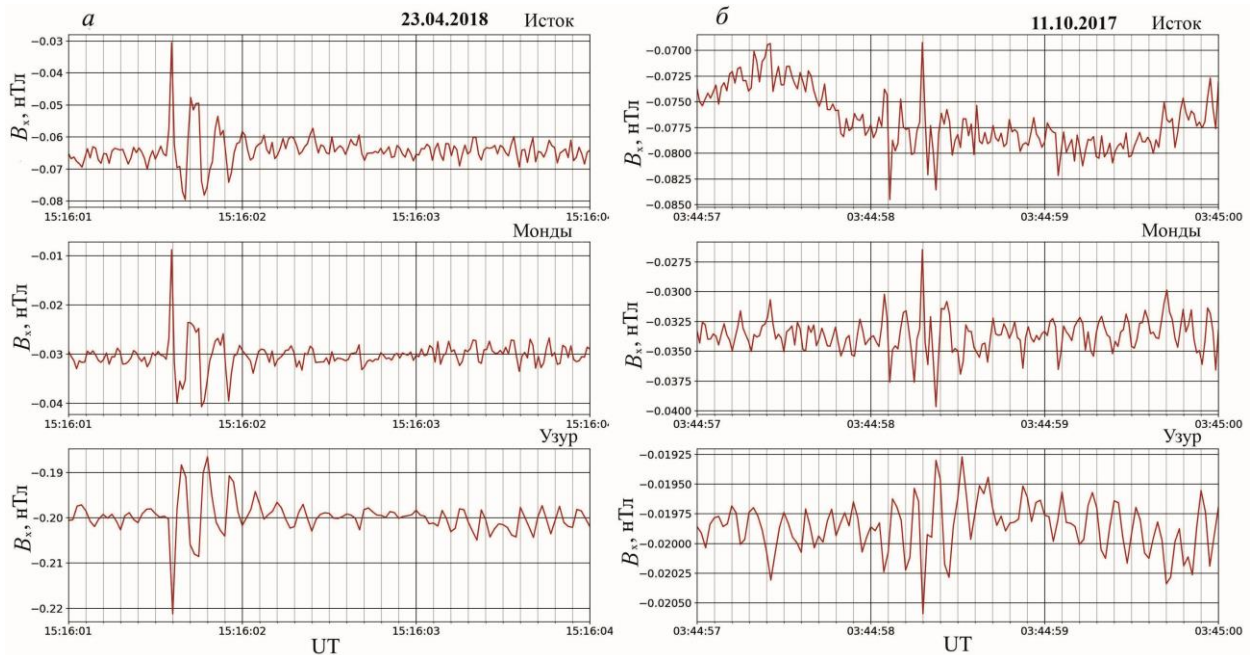


Рис. 3. Примеры УКИ: колебания в виде цуга 23 апреля 2018 г. (а) и парный импульс 11 октября 2017 г. (б)

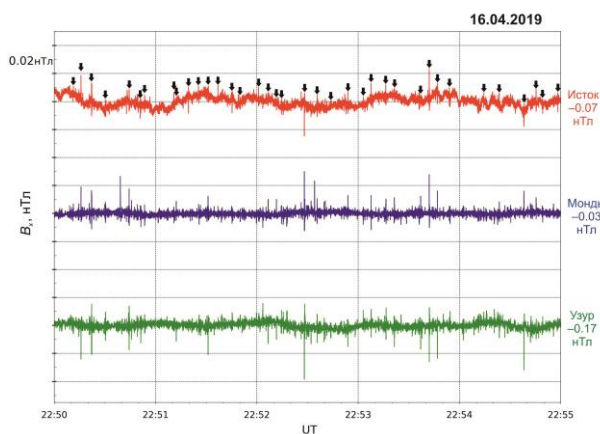


Рис. 4. Геомагнитные пульсации в 22:50–22:55 UT 16 апреля 2019 г. Стрелками указаны наиболее выраженные УКИ

6–12 импульсов/мин (рис. 4). Длительность одного волнового пакета (цуга) составляет от 0.3 до 2 с.

Обычно изучаемые импульсы сохраняют форму волнового пакета сигнала в данных всех трех станций, однако на ст. «Узур» во всех обнаруженных случаях данные колебания находятся в противофазе по сравнению с колебаниями на ст. «Исток» и «Монды». Мы предполагаем, что это связано с не-

правильной установкой датчика X-компоненты на ст. «Узур».

Магнитные вариации, представляющие собой переменное магнитное поле, должны индуцировать в земле электрические токи. Связь теллурических токов с геомагнитными пульсациями была теоретически установлена еще в середине прошлого века в работах [Тихонов, 1950; Cagniard, 1953]. Обнаруженные импульсы также проявляются в земных токах, например, на ст. «Узур» одновременно с УКИ в геомагнитном поле наблюдаются возмущения земных токов (рис. 5).

2. МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИЙ

Для определения статистических характеристик обнаруженных импульсов мы проанализировали записи УКИ на станциях КМИО за 16 апреля 2019 г. Были взяты интервалы длительностью 5 мин с началами в 01:30, 08:30, 11:25, 16:55, 19:10 UT, и в них выполнен поиск УКИ. Критерием наличия УКИ служило синхронное появление на всех трех станциях КМИО характерных короткопериодных возмущений, аналогичных показанным на рис. 3. В итоге было найдено 152 случая УКИ. Данные и результаты

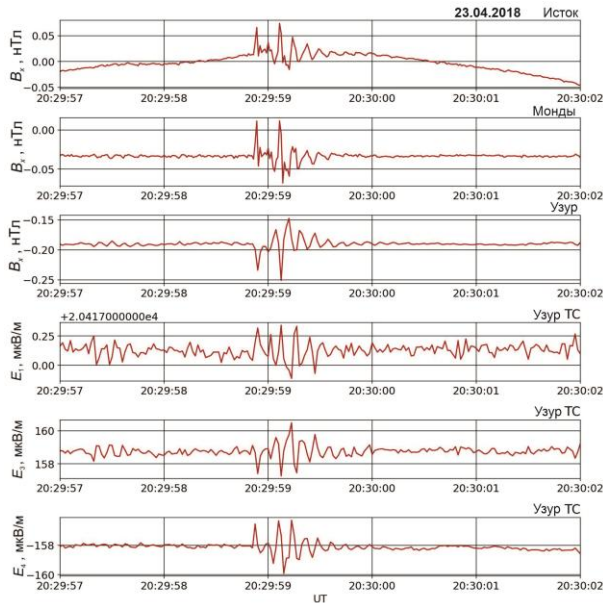


Рис. 5. Возмущения геомагнитного поля и теллурических токов 23 апреля 2018 г.: три верхние панели — B_x -компонента на станциях КМИО, три нижние панели — вариации компонент электрического поля по записям датчиков теллурических токов на ст. «Узур»

их предварительного анализа можно найти по ссылке: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1f10yd47JKR7FJ8HgUzIV13bxfju2Utz0/edit?usp=sharing&ouid=108794281214343087703&rtopof=true&sd=true>. Приведены время, длительность сигнала, амплитуды на трех станциях и отношение амплитуд, измеренных на среднширотной (MND) и высокоширотной (IST) станциях.

Полученные результаты представлены на рис. 6 в виде распределений числа событий по их амплитуде (а), длительности (б) и соотношению между амплитудами на ст. «Монды» и «Исток» (в).

Как уже отмечалось, длительность импульсов лежит в пределах 0.3–2 с, при этом в 77 % случаев она попадает в интервал 0.3–0.8 с. Среднее значение и медиана составляют около 0.7 с. Распределения амплитуд (везде имеется в виду размах колебаний в импульсе, или так называемая двойная амплитуда) на ст. «Исток» и «Монды» имеют острый пик, приходящийся соответственно на интервалы 12–14 и 10–14 пТл. Сюда же попадают медианы распределений амплитуд. Средние величины амплитуд сдвинуты в сторону их больших значений: около 16 пТл на ст. «Исток» и 18 пТл на ст. «Монды». На ст. «Узур» распределение амплитуд более размыто, а среднее значение составляет 20.5 пТл. Интересно сравнить амплитуды УКИ на ст. «Монды» и «Исток». На рис. 6, в, показано распределение логарифма отношения амплитуд на этих станциях. Видно, что случаи превышения амплитудой на одной станции амплитуды на другой практически равновероятны.

Однако вопрос о соотношении амплитуд УКИ в разных точках земной поверхности не так прост, как может показаться. Учитывая частотный диапазон импульсов, их можно рассматривать как кратковременные возмущения мод (стоячих волн) резонатора Шумана. Эти моды, или гармоники, в горизон-

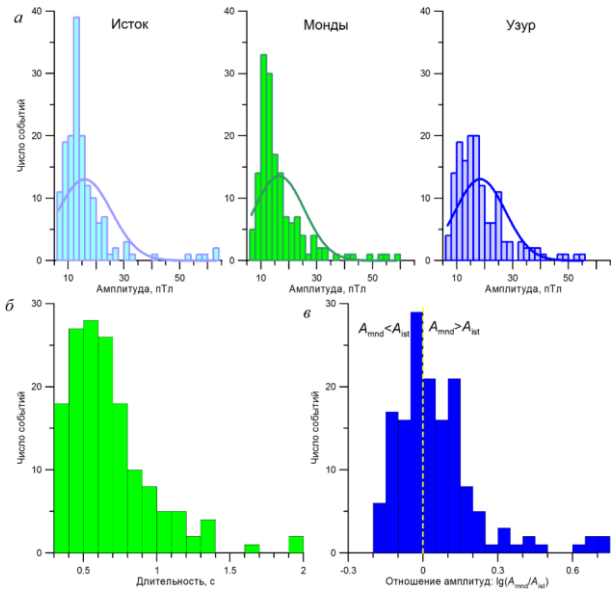


Рис. 6. Статистические характеристики УКИ, полученные по результатам морфологического анализа за 16 апреля 2019 г.

тальном направлении имеют перемежающиеся узлы и пучности, расстояние между которыми зависит от номера гармоники [Satori et al., 2012; <http://janto.ru/repository/008/annex-b.html>]. Вероятно, амплитуда УКИ, измеряемая на земле, будет зависеть от фазы стоячей волны в точке измерения, т. е. она будет максимальной в точках пучностей и минимальной или нулевой в узлах. Мы не вдаемся в этой статье в детали взаимодействия наблюдаемых нами импульсов с модами шумановского резонатора, их анализ требует дальнейшего исследования.

Для анализа распределения энергии по частотам анализируемых импульсов были построены динамические спектры с использованием вейвлет-анализа (рис. 7). Спектры показывают, что основная энергия выделяемых пульсаций приходится на диапазон частот 4–32 Гц. При этом максимумы соответствуют частотам 8, 14, 20 и 26 Гц, близким к частотам гармоник шумановского резонанса.

Ближайшим аналогом рассматриваемых УКИ в диапазоне геомагнитных пульсаций являются пульсации Pi1V, которые возбуждаются и распространяются в ионосфере при высыпании энергичных заряженных частиц в области максимума интенсивности западной электроструи [Пархомов, Рахматулин, 1975]. Pi1V имеют схожую с УКИ периодическую структуру спектров, но частотный диапазон пульсаций Pi1V приходится на более низкие частоты 0.1–5 Гц. По длительности цуга изучаемые УКИ значительно короче (≤ 2 с) Pi1V-пульсаций, длительность которых составляет ≤ 10 мин. Кроме того, частота появления Pi1V намного ниже, чем частота появления УКИ.

Пульсации Pi1V привязаны к авроральной активности, появляются в периоды ее усиления, наблюдаются чаще всего в авроральной зоне, а в средних широтах — только во время мощных возмущений (магнитных бурь) [Mishin et al., 2020]. Привязки УКИ к геомагнитной активности в ходе анализа выявить не удалось. На основании описанных выше фактов

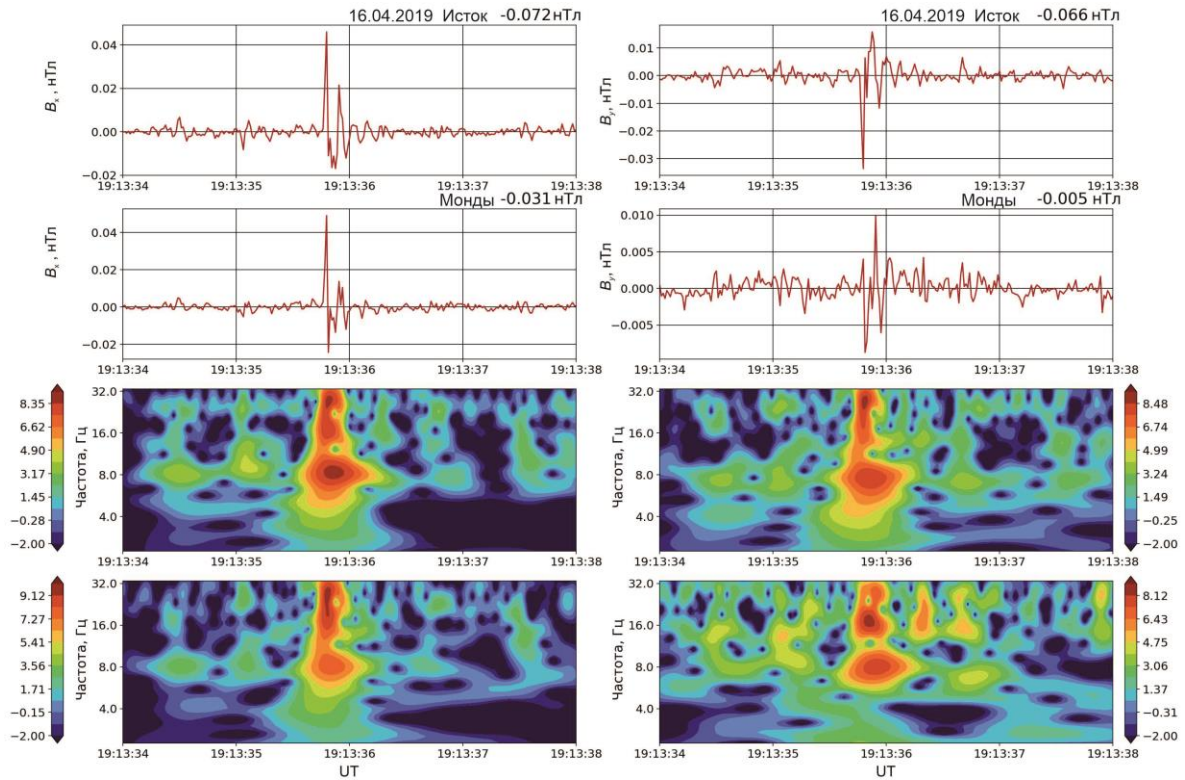


Рис. 7. УКИ в компонентах V_x (две верхние левые панели) и V_y (две верхние правые панели), наблюдавшийся на ст. «Исток» и «Монды» 16 апреля 2019 г. в 19:13:36 UT, и соответствующие динамические спектры (третьи и четвертые сверху панели)

можно с уверенностью утверждать, что рассматриваемые УКИ имеют морфологические и генетические отличия от иррегулярных геомагнитных пульсаций.

3. АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ УКИ НА РАЗНЫХ ДОЛГОТАХ

Для изучения масштабов распространения УКИ по долготе мы выполнили анализ наблюдений на широкой сети наземных станций с привлечением данных канадской сети CARISMA (Canadian Array for Realtime Investigations of Magnetic Activity). Мы выбрали данные станций Ministik Lake (MSTK) и Thief River Falls (THRF), расположенных в Западном полушарии в противоположном по долготе секторе относительно станций ИСЗФ СО РАН.

Анализ данных наблюдений за 17 февраля 2019 г. показал наличие синхронных импульсов в геомагнитном поле на станциях сетей CARISMA и ИСЗФ (рис. 8). Мы изучили задержки между первыми экстремумами УКИ на указанных станциях для примерно 20 наиболее интенсивных УКИ: они варьировали от 0 (с учетом конечности интервалов дискретизации) до 30 ± 20 мс. Нужно учитывать, что частота дискретизации индукционных магнитометров отличается на станциях ИСЗФ и CARISMA, а цуги УКИ могут быть подвержены искажениям на таких больших расстояниях из-за влияния волновода земля–ионосфера, вследствие чего пики могут расплываться и сдвигаться, а задержка увеличиваться.

С учетом высокой степени синхронности появления УКИ на глобальной сети станций разумно предположить, что сигналы распространяются со скоростью

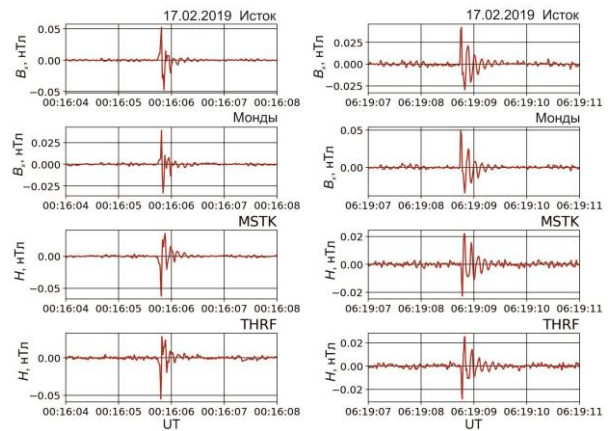


Рис. 8. Два примера УКИ, наблюдавшихся на четырех станциях 17 февраля 2019 г.

света или близкой к ней, а источником импульсов могут быть молниевые разряды в грозовых очагах. Такие очаги располагаются в приэкваториальных областях, и грозовая активность в них имеет постоянный характер.

Используя данные [Christian et al., 2003], мы выбрали точки в вышеописанных областях, где вспышки гроз наблюдаются наиболее часто. В таком случае именно они должны быть наиболее частым источником генерации УКИ. Далее мы получили расстояние от этих точек до выбранных станций с помощью программного пакета Mathematica с функцией GeoDistance, вычисляющей расстояние между пунктами на Земле по их координатам в приближении идеального эллипсоида. После чего мы рассчитали теоретическое минимальное время распространения

Таблица 2

Результаты расчетов времени распространения излучения из очагов повышенной грозовой активности

Точка (-27.75° , -56.25°): Южная Америка, Посадас, Аргентина			
Станция	Расстояние до станции, тыс. км	Теоретическое минимальное время распространения, мс	Задержка по сравнению с минимальным временем распространения, мс
Исток	14.8	49.3	18.25±15.6
Монды	16.7	55.8	24.76±15.6
Узур	16.9	56.3	25.23±25
Ministik Lake	10.5	35.2	4.07±10
Thief River Falls	9.3	31.1	0±10
Точка (-1.25° , 27.75°): Африка, Камембе, Руанда			
Исток	9	30.20	0.30±15.6
Монды	8.9	29.90	0±15.6
Узур	9.4	31.46	1.55±25
Ministik Lake	13.2	44.00	14.10±10
Thief River Falls	12.5	41.94	12.03±10
Точка (3.25° , 101.75°): Азия, Куала Лумпур, Малайзия			
Исток	9	24.92	7.05±15.6
Монды	8.9	17.87	0±15.6
Узур	9.4	18.51	0.64±25
Ministik Lake	13.1	43.09	25.22±10
Thief River Falls	12.5	46.80	28.93±10

УКИ, полагая скорость распространения равной скорости света, и вычислили задержки по сравнению с минимальным временем распространения для каждой станции.

Полученные результаты показывают (табл. 2), что регистрация сигналов при распространении излучения со световой скоростью осуществляется на пределе разрешающей способности магнитометров. В случае когда грозы происходят в регионе Южной Америки или Азии, мы еще можем увидеть задержку между УКИ, но при грозах в Африке или на более высоких широтах, чем взятые для расчетов в табл. 2, при имеющемся временном разрешении УКИ будут фиксироваться синхронно на всех используемых станциях. Заметим, однако, что все полученные задержки — положительные или нулевые, что вполне объяснимо. На самом деле сигналы распространяются не строго вдоль земной поверхности, а выше, отражаясь попеременно от земли и ионосферы.

Возникает еще один интересный вопрос. Судя по сравнению амплитуд синхронных импульсов на разных станциях, затухание сигналов очень мало. Почему же тогда не наблюдается эффекта кругосветного эха? Вероятно, потому, что заметить такой эффект при имеющейся форме сигнала очень трудно: время пробега сигнала вокруг Земли (~ 0.13 с) сравнимо с длительностью импульса (0.3–2 с) и повторный сигнал теряется на фоне хвоста импульса. Впрочем, наблюдающиеся иногда двойные импульсы (см. рис. 1, б) вполне могут оказаться проявлением кругосветного эха, однако этот вопрос требует дополнительного рассмотрения.

4. СВЯЗЬ УКИ С ГЛОБАЛЬНОЙ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Генерация геомагнитных пульсаций, близких к изучаемому диапазону — резонансов Шумана и излучения ИАР, в ходе грозовой активности была исследована в работах [Surkov et al., 2006; Fedorov et al., 2006]. Экспериментально она была проанализирована в работе [Schekotov et al., 2011]. В этих работах внимание уделяется лишь генерации пульсаций от ближайших гроз, а вклад от далеких считается незначительным. Наблюдаемые же нами УКИ появляются с одинаковой частотой и в зимние периоды, когда грозовая активность в Северном полушарии на средних и высоких широтах отсутствует. Поэтому мы выдвинули предположение, что источник генерации обнаруженных пульсаций находится в экваториальной зоне, где расположены постоянные области мощных гроз [Blakeslee et al., 2014].

Разряды молний, создаваемые большим градиентом электрического потенциала, вызывающим сильное электрическое поле, порождают мощные электромагнитные импульсы. Эти импульсы называют атмосфериками, или сфериками. Они могут распространяться на многие километры благодаря волноводу между нижней ионосферой и поверхностью Земли. Максимальная дальность распространения сфериков достигает нескольких тысяч километров [Швец и др., 2015]. В случае если сферика просачивается через ионосферу вдоль силовых линий геомагнитного поля (так называемые свистящие атмо-

сферике), они могут распространяться на еще большие расстояния, достигая даже полярных широт [Гершман, Угаров, 1960; Allcock, 1960]. Основная часть энергии сфериков лежит в диапазонах СНЧ (30–300 Гц) и ОНЧ (3–30 кГц), т. е. частота излучения сфериков и свистящих атмосфериков значительно выше диапазона УНЧ.

Выбор молниевых разрядов как источника УКИ может объяснить их высокую частоту возникновения, глобальный масштаб наблюдения и скорость распространения. Однако, по спутниковым данным, частота возникновения молниевых разрядов в масштабах всей земной атмосферы составляет $f \leq 44 \pm 5 \text{ с}^{-1}$, а в целом за год наблюдается $\sim 1.4 \cdot 10^9$ молний [Encyclopedia, 2005], что на порядок выше полученной нами частоты возникновения УКИ (6–12 импульсов/мин). Следовательно, не все грозовые разряды вызывают УКИ.

Проанализировав литературу по частотному диапазону различных типов молниевых разрядов, мы обнаружили, что наиболее близким к диапазону УКИ является частотный интервал, возбуждаемый молниями особого типа — так называемыми красными спрайтами. Это молниевые разряды в верхней атмосфере на высотах от 40 до 100 км [Rodger, 1999], инициируемые сильными положительными разрядами облако–земля [Huang et al., 1999; Price et al., 2002; Williams et al., 2007]. Длительность свечения спрайтов обычно равна нескольким миллисекундам, однако светимость отдельных частей спрайта может превышать 100 мс [Lu et al., 2013]. Задержка во времени по отношению к началу вызвавшей молнии составляет от ~ 3 мс [Winckler, 1995] до нескольких десятков миллисекунд [Fukunishi et al., 1995], а по результатам наблюдений [Wang et al., 2019] может доходить до сотен миллисекунд.

Согласно работе [Paras, Rai, 2012], основной диапазон излучения красных спрайтов приходится на частоты до 300 Гц с максимумом излучения на 40 Гц. Частота возникновения спрайтов, по данным [Price, 2016], составляет порядка нескольких случаев в минуту. Эти характеристики значительно ближе к характеристикам УКИ.

4.1. Анализ связи УКИ с возникновением красных спрайтов

Для проверки предположения о генерации УКИ красными спрайтами мы использовали статью [Wang et al., 2019], в которой проводилась фиксация времени возникновения красных спрайтов на основе одновременных наблюдений на двух станциях в Северном Китае. Спрайты были зарегистрированы в 15:29:11.2815, 15:40:19.1388, 15:48:58.4567, 15:57:27.6660, 16:00:28.6739 и 17:29:50.5918 UT. Сопоставив полученные результаты с данными по пульсациям на ст. «Исток», «Монды» и MSTK, мы обнаружили, что вслед за каждым из шести проанализированных в [Wang et al., 2019] случаев регистрации красных спрайтов наблюдаются УКИ на станциях нашей комплексной сети. Это видно на рис. 9, где штриховыми красными линиями показаны моменты возникновения красных спрайтов.

Наибольший интерес вызывает второе событие, в котором наблюдался спрайт в форме медузы

(jellyfish) с пиковым значением тока первого разряда. Оно вызвало УКИ с размахом колебания порядка 0.2 нТл. Такая большая амплитуда обычно характерна для медленных геомагнитных пульсаций минутных периодов, связанных с развитием геомагнитной активности, а не для короткопериодных пульсаций. Подобные УКИ с размахом порядка 0.1 нТл могут фиксироваться несколько раз за 5 мин. Характерные же амплитуды УКИ (порядка 20 пТл в зависимости от станции), приведенные выше в разделе «Морфологический анализ», наблюдаются при возникновении менее мощных красных спрайтов (события 1, 3–6).

Выявить точную задержку между УКИ и возникновением красных спрайтов затруднительно по причине низкой разрешающей способности индукционных магнитометров, а также ввиду того, что сложно определить начало УКИ на фоне шума в данных по геомагнитным пульсациям. Однако можно оценить, что задержка составляет несколько десятков миллисекунд. Так, для события 2 время между возникновением красного спрайта и первыми пиками цуга колебаний на ст. «Исток», «Монды» и MSTK составило 32.8 ± 15.6 , 17.2 ± 15.6 и 61 ± 10 мс соответственно. Координаты события соответствуют следующим значениям (см. рис. 7 работы [Wang et al., 2019]): 40.4° N , 116.7° E . Поэтому теоретическая оценка задержки для этого события составляет 12.3, 5.8 и 28.6 мс соответственно. Таким образом, для самой близкой станции «Монды», по нашим оценкам, задержка укладывается в интервал неопределенности измерений, составляющий от 1.6 до 32.8 мс, для более далекой станции «Исток» задержка ненамного выходит за пределы интервала неопределенности 17.2–48.4 мс, а для самой удаленной станции MSTK она лежит уже далеко от соответствующего интервала неопределенности 51–71 мс. Во всех случаях значение лежит ниже интервала неопределенности измерений либо в его нижней части, т. е. скорость распространения сигнала оказывается ниже скорости света и чем больше расстояние, тем заметнее разница (то же прослеживается и в табл. 2.)

Это наводит на мысль о том, что процесс распространения сигнала не похож на простой перенос импульса с постоянной скоростью в однородной среде. В реальности мы имеем дело с распространением импульсного возмущения в сферическом неоднородном волноводе, являющемся к тому же резонатором Шумана. Проблема в том, что мы не знаем, как происходит взаимодействие импульса, являющегося набором несобственных для резонатора частот, с собственными модами резонатора. Вопрос этот требует серьезной теоретической проработки. Наша же статья предоставляет некоторый экспериментальный материал для такой работы.

Подводя итог, можно отметить, что все шесть случаев электрических спрайтов из [Wang et al., 2019] повлекли за собой появление УКИ. К сожалению, мы лишены возможности провести строгий статистический анализ связи между спрайтами и УКИ из-за отсутствия дополнительных данных наблюдений спрайтов. Мы можем сделать вывод, что с большой вероятностью все спрайты приводят к генерации

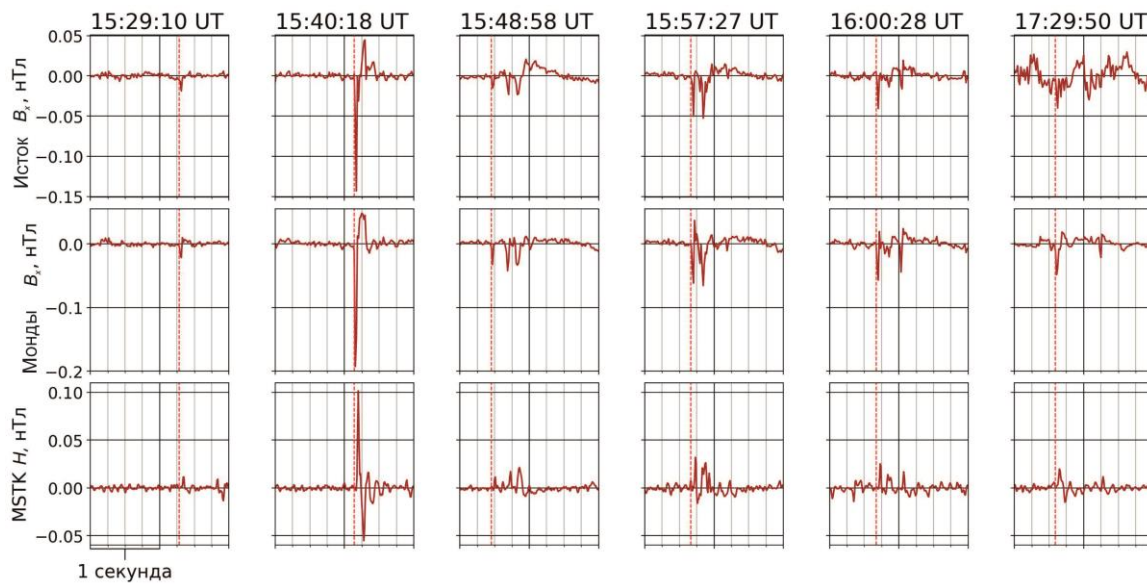


Рис. 9. УКИ, наблюдавшиеся на ст. «Исток», «Монды» и MSTK вслед за спрайтами, зарегистрированными в Северном Китае 8 августа 2017 г. [Wang et al., 2019]

УКИ, но не можем сказать, все ли УКИ имеют своим источником спрайты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами были обнаружены и проанализированы ультракороткопериодные пульсации, наблюдаемые синхронно на сети станций индукционных магнитометров на средних и высоких широтах. На основе более чем 150 случаев наблюдения УКИ проведен морфологический анализ, в ходе которого получены их статистические характеристики. Изучены спектры изучаемых пульсаций. Далее мы расширили область наблюдения УКИ вдоль параллели на Западное полушарие. Было выдвинуто предположение о грозовой природе источника изучаемых импульсов. После анализа литературы по данной тематике мы предположили, что источником УКИ являются не любые молниевые разряды, а возникающие при особо мощных грозах красные спрайты, излучение которых лежит в диапазоне, близком к диапазону УКИ. Мы обнаружили, что УКИ возникают после каждого случая красных спрайтов, зафиксированного Wang et al. [2019] в Северном Китае.

В качестве продолжения работы следовало бы уделить внимание систематизации УКИ и выделению характерных морфологических свойств отдельных подвидов УКИ. Интерес представляет также изучение степени затухания этих импульсов в зависимости от состояния волновода земля–ионосфера. Полезно также попытаться отыскать случаи кругосветного эха подобных импульсов (которые должны наблюдаться при таком малом затухании амплитуды). Кроме того, чтобы выявить корреляцию характеристик УКИ со временем суток и геомагнитной активностью, необходимо научиться выделять УКИ автоматически корреляционными методами. Необходимо также провести сопоставление УКИ с большим числом красных спрайтов, наблюдаемых по всему миру, и изучить связь УКИ с другими мол-

ниевыми разрядами верхней атмосферы — синими джеттами и эльфами.

Полученные результаты дают новую информацию о перераспределении энергии гроз в атмосфере и ее частичной передаче в волноводные атмосферно-ионосферные структуры. Так, факт совпадения спектральных максимумов УКИ с частотами гармоник шумановского резонатора явно говорит о том, что обнаруженные нами импульсы подпитывают колебания в этом резонаторе. Вполне можно предполагать, что далее эта энергия может перетекать и в ИАР, и в магнитозвуковой волновод в слое F2 ионосферы. Имеется много свидетельств, как теоретических, так и экспериментальных, тесной связи и взаимодействия упомянутых волноводных и резонансных структур [Lysak, Yoshikawa, 2006; Потапов и др., 2021].

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-27-00280.

Один из авторов (Р.А.М.) искренне благодарен своему первому научному руководителю Р.А. Рахматулину (1947–2020) за постановку задачи и помощь в анализе данных на первых этапах исследования. Авторы признательны Р.В. Васильеву и А.В. Ойнацу за полезные обсуждения.

Авторы благодарят организаторов и операторов канадской сети CARISMA и лично д-ров I.R. Mann, D.K. Milling за возможность использования данных индукционных магнитометров. CARISMA управляется Университетом Альберты и финансируется Канадским космическим агентством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гершман Б.Н., Угаров В.А. Распространение и генерация низкочастотных электромагнитных волн в верхней атмосфере. *УФН*. 1960. Т. 72. С. 235–271. DOI: [10.1070/PU1961v003n05ABEH005809](https://doi.org/10.1070/PU1961v003n05ABEH005809).

Пархомов В.А., Рахматулин Р.А. Локализация источника P11B. *Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца*. 1975. Вып. 36. С. 132–138.

Потапов А.С., Полюшкина Т.Н., Цэгмэд Б. Морфология и диагностический потенциал ионосферного альвеновского резонатора. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 39–56. DOI: [10.12737/szf-73202104](https://doi.org/10.12737/szf-73202104).

Тихонов А.Н. Об определении электрических характеристик глубоких слоев земной коры. *Доклады АН СССР*. 1950. Т. 73, № 2. С. 295–297.

Швец А.В., Кривонос А.П., Сердюк Т.Н., Горишня Я.Ю. Оценка параметров профиля проводимости нижней ионосферы на основе анализа твик-атмосфериков. *Радиофизика и электроника*. 2015. № 20. С. 40–47. DOI: [10.15407/rej](https://doi.org/10.15407/rej) 2015.01.040.

Allcock G.McK. Propagation of whistlers to polar latitudes. *Nature*. 1960. Vol. 188. P. 732–733. DOI: [10.1038/188732a0](https://doi.org/10.1038/188732a0).

Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Y. Theory for the formation of resonance structure in the spectrum of atmospheric electromagnetic background noise in the range of short-period geomagnetic pulsations. *Radiophys. Quantum Electron*. 1989. Vol. 32, no. 7. P. 594–601.

Blakeslee R.J., Mach D.M., Bateman M.G., Bailey J.C. Seasonal variations in the lightning diurnal cycle and implications for the global electric circuit. *Atmos. Res*. 2014. Vol. 135–136. P. 228–243. DOI: [10.1016/j.atmosres.2012.09.023](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.09.023).

Cagniard L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*. 1953. Vol. 18, no. 3. P. 605–635.

Christian H.J., Blakeslee R.J., Boccippio D.J., et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, iss. D1, P. ACL4-1–ACL4-15. DOI: [10.1029/2002JD002347](https://doi.org/10.1029/2002JD002347).

Encyclopedia of World Climatology. Springer, 2005. 854 p. DOI: [10.1007/1-4020-3266-8](https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8).

Fedorov E., Schekotov A.Ju., Molchanov O.A., et al. An energy source for the mid-latitude IAR: World thunderstorm centers, nearby discharges or neutral wind fluctuations? *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006. Vol. 31. P. 462–468. DOI: [10.1016/j.pce.2006.02.001](https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.001).

Fukunishi H., Takahashi Y., Kubota M., et al. Lower ionospheric flashes induced by lightning discharges. *EOS Supplement*. 1995. Vol. 46. P. F114.

Huang E., Williams E., Boldy R., et al. Criteria for sprites and elves based on Schumann resonance observations. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 1999. Vol. 104, no. D14. P. 16943–16964. DOI: [10.1029/1999JD900139](https://doi.org/10.1029/1999JD900139).

Lu G., Cummer S.A., Li J., et al. Coordinated observations of sprites and in-cloud lightning flash structure. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. Vol. 118, no. 12. P. 6607–6632. DOI: [10.1002/jgrd.50459](https://doi.org/10.1002/jgrd.50459).

Lysak R.L., Yoshikawa A. Resonant cavities and waveguides in the ionosphere and atmosphere. *Geophysical Monograph Series*. 2006. Vol. 169. P. 289–306. DOI: [10.1029/169GM19](https://doi.org/10.1029/169GM19).

Mann I.R., Milling D.K., Rae I.J., et al. The upgraded CARISMA magnetometer array in the THEMIS era. *Space Sci. Rev.* 2008. Vol. 141. P. 413–451. DOI: [10.1007/s11214-008-9457-6](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9457-6).

Mishin V.V., Tsegmed B., Klivanova Y.Y., Kurikalova M.A. Burst geomagnetic pulsations as indicators of substorm expansion onsets during storms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020. Vol. 125, iss. 10. 15 p. DOI: [10.1029/2020JA028521](https://doi.org/10.1029/2020JA028521).

Nose M., Uyeshima M., Kawai J., Hase H. Ionospheric Alfvén resonator observed at low-latitude ground station, Muroto. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122, no. 7. P. 7240–7255. DOI: [10.1002/2017JA024204](https://doi.org/10.1002/2017JA024204).

Paras M., Rai J. Electrical parameters of red sprites. *Atmosfera*. 2012. Vol. 25, no. 4. P. 371–380.

Price C. ELF Electromagnetic waves from lightning: The Schumann resonances. *Atmosphere*. 2016. Vol. 7, no. 116. 20 p. DOI: [10.3390/atmos7090116](https://doi.org/10.3390/atmos7090116).

Price C., Asfur M., Lyons W., Nelson T. An improved ELF/VLF method for globally geolocating sprite-producing lightning. *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29, no. 3. P. 1–1–1–4. DOI: [10.1029/2001GL013519](https://doi.org/10.1029/2001GL013519).

Rodger C.J. Red sprites, upward lightning, and VLF perturbations. *Rev. Geophys.* 1999. Vol. 37, no. 3. P. 317–336. DOI: [10.1029/1999RG900006](https://doi.org/10.1029/1999RG900006).

Satori G., Mushtak V., Neska M., et al. Global lightning dynamics deduced from Schumann resonance frequency variations at two sites ~550 km apart. *Geophys. Res. Abstr.* 2012. Vol. 14. EGU2012-10647.

Schekotov A., Pilipenko V., Shiokawa K., Fedorov E. ULF impulsive magnetic response at mid-latitudes to lightning activity. *Earth and Planetary Physics*. 2011. Vol. 63, no. 2. P. 119–128. DOI: [10.5047/eps.2010.12.009](https://doi.org/10.5047/eps.2010.12.009).

Surkov V.V., Hayakawa M., Schekotov A.Y., et al. Ionospheric Alfvén resonator excitation due to nearby thunderstorms. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, iss. A1. 13 p. DOI: [10.1029/2005JA011320](https://doi.org/10.1029/2005JA011320).

Wang Y., Lu G., Ming M., et al. Triangulation of red sprites observed above a mesoscale convective system in North China. *Earth and Planetary Physics*. 2019. Vol. 3. P. 111–125. DOI: [10.26464/epp2019015](https://doi.org/10.26464/epp2019015).

Williams E., Downes E., Boldi R., et al. Polarity asymmetry of sprite-producing lightning: A paradox? *Radio Sci.* 2007. Vol. 42, no. 2. 15 p. DOI: [10.1029/2006RS003488](https://doi.org/10.1029/2006RS003488).

Winckler J.R. Further observations of cloud-ionosphere electrical discharges above thunderstorms. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 1995. Vol. 100, iss. D7. P. 14335–14345. DOI: [10.1029/95JD00082](https://doi.org/10.1029/95JD00082).

URL: http://lemisensors.com/wp-content/uploads/2018/03/LEMI-030_Datasheet.pdf (дата обращения 30 марта 2022 г.).

URL: <http://www.carisma.ca/background/carisma-induction-coils> (дата обращения 30 марта 2022 г.).

URL: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1f10yd47JKR7FJ8HgUzIVi3bxjfu2UtZ0/edit?usp=sharing&ouid=108794281214343087703&rtfpof=true&sd=true> (дата обращения 30 марта 2022 г.).

URL: <http://janto.ru/repository/008/annex-b.html> (дата обращения 30 марта 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Марчук Р.А., Потапов А.С., Мишин В.В. Синхронные глобально наблюдаемые ультракороткопериодные импульсы. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 2. С. 52–60. DOI: [10.12737/szf-82202207](https://doi.org/10.12737/szf-82202207).