

**Q-ВСПЛЕСКИ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ПРИ КОНТАКТЕ
МЕЖПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С МАГНИТОСФЕРОЙ****В.А. Пархомов¹, В.В. Сафаргалеев², Р.А. Рахматулин³, Л.В. Казанцев¹**¹ Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация² Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация³ Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация**Информация о статье**Дата поступления
10 марта 2022 г.Дата принятия к печати
8 апреля 2022 г.Дата онлайн-размещения
27 апреля 2022 г.**Ключевые слова**

Q-всплески; шумановский резонанс; волновод Земля — ионосфера; ультранизкочастотные электромагнитные излучения; межпланетная ударная волна

Аннотация

Приводятся результаты регистрации и анализа глобального кратковременного цуга затухающих колебаний в частотном диапазоне 0,5–30,0 Гц, зарегистрированного 9 сентября 2011 г. на начальной фазе предварительного импульса внезапного начала. Изучены пространственные особенности спектра колебаний. Обнаружена спектрально-резонансная структура всплесков, которая наблюдается глобально. Сделано предположение, что всплески генерируются в результате мощных молниевых разрядов, создающих в ионосфере красные спрайты. Электромагнитное излучение спрайтов захватывается в волновод Земля — ионосфера и распространяется глобально. Предполагается, что одной из причин возрастания мощности Q-сигнала является совпадение начала его генерации с усилением ионосферной токовой системы предварительного импульса внезапного начала SC.

Original article

**Q-BURSTS GENERATED BY THE CONTACT
OF THE INTERPLANETARY SHOCK WAVE
WITH THE MAGNETOSPHERE****Vladimir A. Parkhomov¹, Vladimir V. Safargaleev², Ravil A. Rakhmatulin³,
Leonid V. Kazantsev¹**¹ Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation² St. Petersburg Branch of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, the Russian Federation³ Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation**Article info**Received
March 10, 2022Accepted
April 8, 2022Available online
April 27, 2022**Keywords**

Q-bursts; Schumann resonance; waveguide Earth — ionosphere; ultralow frequency electromagnetic radiation; interplanetary shock wave

Abstract

The study presents the results of the global registration of a short-term train of damped oscillations in the frequency range 0,5–30,0 Hz (Q-burst), observed at the initial phase of the preliminary impulse of the sudden onset SC on 09.09.2011. The spatial features of the spectrum of train oscillations are studied. We discovered A spectral-resonance structure of bursts, which is observed globally. It is assumed that bursts are generated as a result of powerful lightning discharges that create red sprites in the ionosphere. The electromagnetic radiation of sprites is captured in the earth-ionosphere waveguide and propagates globally. We assumed that one of the reasons for the increase in the power of the Q-signal is the coincidence of the beginning of its generation with the amplification of the ionospheric current system of the preliminary impulse of the sudden onset of SC.

Введение

Q-всплески являются изолированными большими кратковременными затухающими колебаниями в частотном диапазоне 0,5–30,0 Гц, длящимися 0,3–1,5 с. Когда в 1966 г. Q-всплески были идентифицированы и изучены в узкой спектральной полосе наблюдений [1; 2], было показано, что основная частота всплесков равна ~ 8 Гц. Это является фундаментальным модом частоты шумановского резонанса в полости Земля — ионосфера. Также всплески проявились на частоте 14 Гц — второй гармонике (моды) частоты [3]. Для того чтобы рассмотреть механизм Q-всплесков, необходимо наблюдать более точные волновые формы в широком диапазоне частот.

Спустя 29 лет после первой идентификации Q-всплесков было обнаружено, что они являются электромагнитными волнами, излучаемыми большим положительной полярности молниевым разрядом, связанным со спрайтом оптической эмиссии [4], который был недавно открыт в верхней атмосфере [5].

Наблюдаемое наибольшее изменение разрядного момента связано с положительным облаком и направленным к земле ударом. Разряд одновременно производит спрайты и Q-всплески в полости Земля — ионосфера [6]. В 15 % случаев Q-всплесков также проявлялись Q-всплески отрицательной полярности [3; 7].

Электромагнитные волны, излучаемые спрайтами, исследовались многими группами ученых теоретически и экспериментально. Критерии для спрайтов, обосновывающие наблюдения шумановского резонанса, обсуждались в [6], где показано, что только очень большие и ярчайшие спрайты будут демонстрировать электромагнитные черты.

В [8] рассматривалось распространение ELF-радиации от системы RS-LC и красного спрайта в волноводе Земля — ионосфера. Проанализировано два различных механизма возвратных наклонных разрядов корональной системы RS-LC и красных спрайтов, которые возбуждают волновод Земля — ионосфера. Вычислены электрические и магнитные поля для системы RS-LC и красных спрайтов в волноводе Земля — ионосфера. Обнаружено, что красные спрайты вкладывают в шумановские резонансы больше, чем системы RS-LC.

Что касается пространственного распространения Q-всплесков, то в [3] описан случай глобального распространения, когда

всплески одновременно с точностью до 0,1 с наблюдались на расстоянии 86° широты и 155° долготы. Это событие регистрировалось в 08:01:37 UT при низкой магнитной активности. Индекс K_p в трехчасовом интервале 6–9 часов равнялся 0.

В [9] даны результаты наблюдений, спектрального анализа, моделирования и интерпретации откликов ультранизкочастотных колебаний диапазона Pc1 на молниевые разряды на удалении до 350 км от станции наблюдения. Сигналы показали спектрально-резонансную структуру (СРС). Моделирование с искусственными сигналами продемонстрировало, что многополосная СРС может формироваться за счет появления парных импульсов в анализируемых временных рядах. Статистический метод наложения эпох выявил преобладание двухимпульсной структуры фона магнитного поля в периоды возникновения СРС. Однако авторы не называют исследуемые колебания Q-всплесками.

В результате тщательного анализа литературы выявлено, что вероятность наблюдения всплесков не связана с состоянием магнитной активности. Не встретилось упоминаний о наблюдении Q-всплесков во время внезапных начал магнитных бурь. Поэтому приведенные ниже результаты могут вызвать отторжение у специалистов, занимающихся изучением Q-всплесков, поскольку можно отнести описанное ниже событие к случайному появлению в данный момент, а можно считать, что источником всплеска является грозовой разряд, случайно совпавший по времени с моментом взаимодействия межпланетной ударной волны (МУВ) с магнитосферой.

Цель дальнейшего изложения — показать, что всплески излучений в частотном диапазоне 0,5–30,0 Гц, глобально зарегистрированные 9 сентября 2011 г., вероятно, возбуждаются (или усиливаются) в результате взаимодействия фронта МУВ с магнитосферой, которая генерирует внезапное начало с предварительным импульсом (SC^{*}). Предварительный импульс связывают с возбуждением ионосферного тока, текущего в направлении, обратном току главного импульса SC [10]. Свойства исследуемых нами всплесков в частотном диапазоне 0,5–30,0 Гц имеют отличия от свойств обычно наблюдаемых Q-всплесков.

Событие 9 сентября 2011 г.

В этот день на семи спутниках (рис. 1) была зарегистрирована МУВ. Спутником

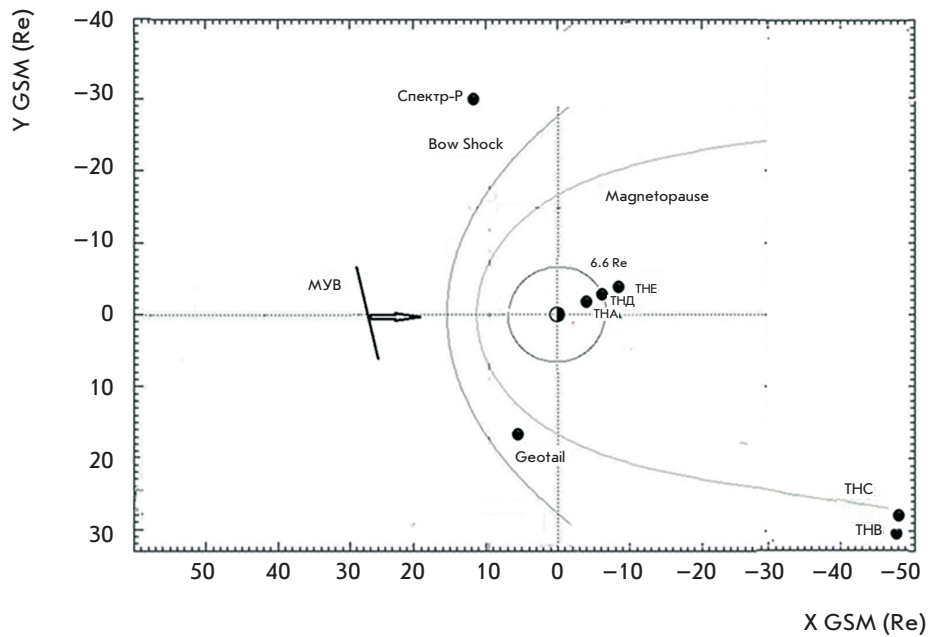


Рис. 1. Схема расположения спутников 9 сентября 2011 г.

WIND в 11:47:30 (спутниковое время) отмечен большой скачок концентрации протонов солнечного ветра ($\Delta_N \sim 24 \text{ см}^{-3}$) при небольших скачках скорости ($\Delta_v \sim 50 \text{ км/с}$) и модуля ММП ($B_z \sim 2 \text{ нТ}$). Спутник «Спектр-Р», который находился вблизи магнитопаузы (см. рис. 1), в 12:41:22 на фронте волны зарегистрировал резкий (в течение 0,5 с) (рис. 2, а) и большой (от 35 до 69 см^{-3}) (рис. 2, в) скачок концентрации солнечного ветра. МУВ наблюдалась на фоне ориентации вертикальной компоненты ММП к северу. МУВ вызвала гигантское внезапное начало маг-

нитной бури (SSC*) (в Иркутске $\Delta H = 72 \text{ нТл}$) с предварительным импульсом амплитудой $\sim 25 \text{ нТл}$, зафиксированной в обсерватории Нурмиярви. На рис. 2, б приведен фрагмент спектрограммы, на которой виден импульсный всплеск с CPC (структура обозначена стрелкой).

Верхняя частота всплеска равна 5 Гц, но на «сванограмме» обсерватории Монды верхняя частота всплеска достигает 30 Гц (рис. 3, а). Аналогичная структура спектра наблюдается и на спектрограмме обсерватории Узур (рис. 3, б).

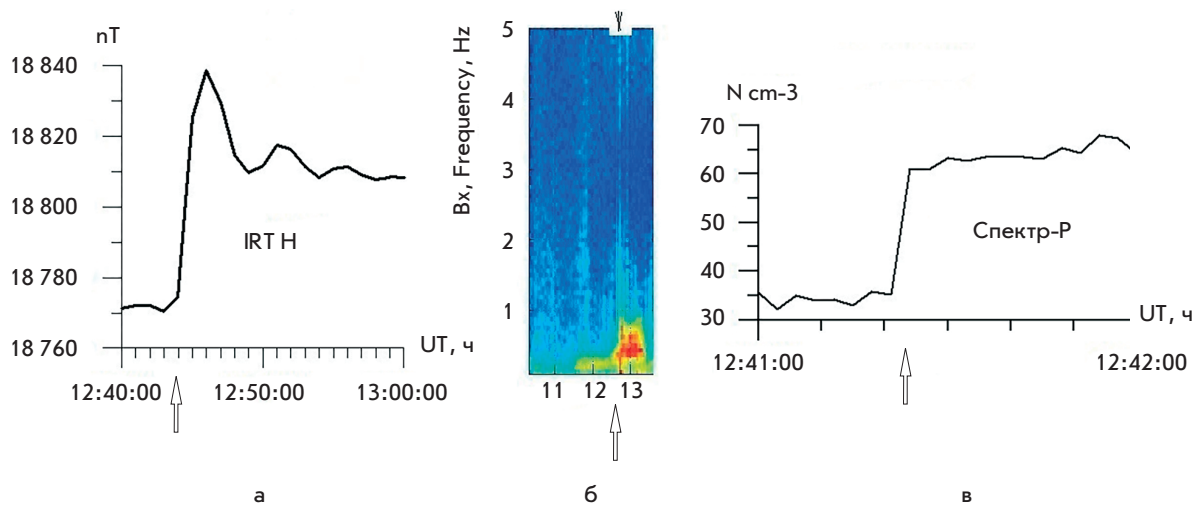


Рис. 2. Фрагменты измерений МУВ, зарегистрированной 9 сентября 2011 г.: магнитограмма обсерватории Иркутск (а); спектрограмма обсерватории Монды (б); вариации концентрации протонов солнечного ветра на спутнике «Спектр-Р» (в)

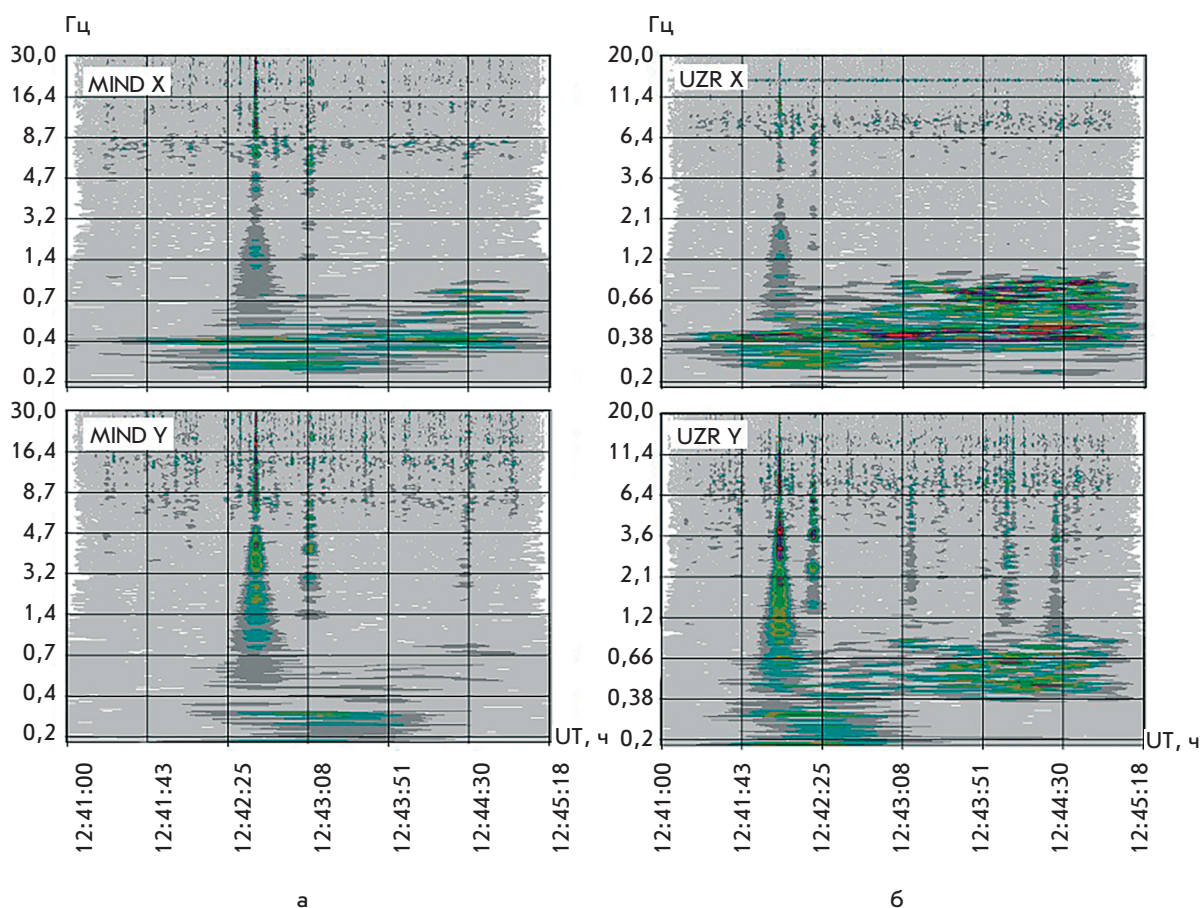


Рис. 3. Спектрограммы Q-всплеска, зарегистрированного 9 сентября 2011 г. среднеширотными обсерваториями Монды (а) и Узур (б) в вечерние часы местного времени (MLT = UT + 7)

Примечание: Обращает на себя внимание верхняя частота всплеска ~ 30 Гц и резонансная структура спектра (СРС). Видны повторные более слабые всплески подобной структуры, но с более высокой начальной частотой возбуждения (0,5–1,0 Гц).

Заметим, что спутник «Спектр-Р» регистрирует ударную волну с параметрами волновой нормали $NGSE = (-0,98, -0,17, -0,12)$ в 12:41:28,30 (см. рис. 1). МУВ была зарегистрирована также спутником «Геотейл», который находился на солнечной стороне в магнитослое. Время прихода волны на «Геотейл» — 12:41:27 UT (можно оценить по одноминутным данным).

Наземные наблюдения

На рис. 4 приведены вариации концентрации солнечного ветра на фронте МУВ, зарегистрированные «Спектром-Р», и фрагмент магнитограммы обсерватории Нурмиярви, которая находится вблизи полудня. Стрелкой 1 отмечен Q-всплеск, время регистрации которого — 12:42:39,8 — совпадает с началом предварительного импульса, отмеченного стрелкой 2. Предварительный импульс длился 60 с, а затем в 12:42:40 начался главный импульс (стрелка 3). Начало Q-всплеска регистрируется в 12:42:39,8,

т.е. через ~ 70 с после регистрации МУВ спутником «Геотейл». Спутник находится в магнитослое на расстоянии $\sim 18 R_e$, следовательно, если считать источником МУВ, то скорость распространения сигнала составляет $\sim 1\,632$ км/с.

На рис. 5 с большим временным разрешением приведены фрагменты осциллограмм индукционных магнитометров на сети обсерваторий на дневной и ночной сторонах Земли. Координаты обсерваторий, тип приборов и частоты квантования даны в таблице.

Всплески регистрируются одновременно обсерваториями на дневной (Баренцбург (13 MLT), Узур и Монды (18 MLT)) и ночной (MLT 0–6) сторонах Земли в 12:42:39,85. С запаздыванием на 0,1 с всплески отмечаются меридиональной цепочкой финских обсерваторий (14 MLT). Можно предположить, что такое запаздывание вступления сигнала связано с его распространением в волноводе Земля — ионосфера на запад от источника.

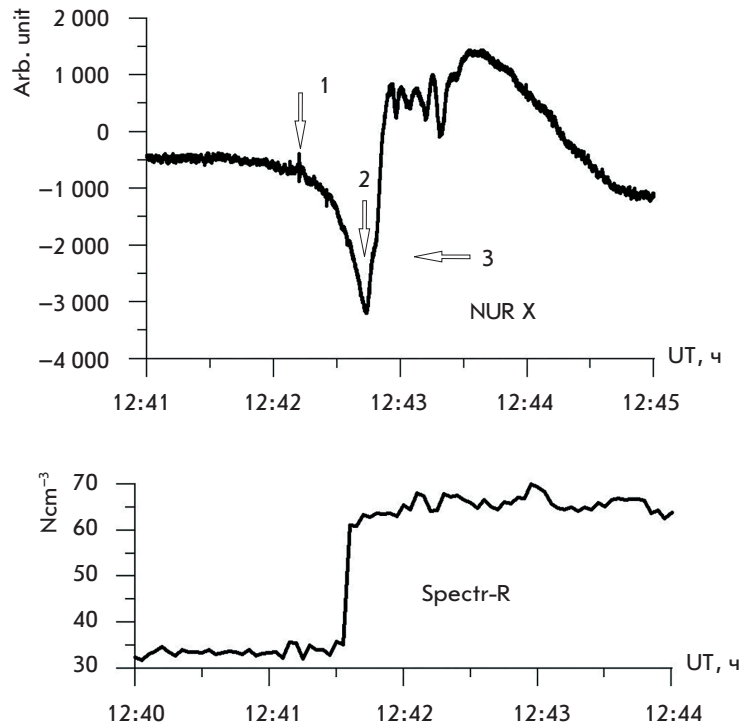


Рис. 4. Фрагмент магнитограммы обсерватории Нурмиярви с записью предварительного обратного импульса от 9 сентября 2011 г. (стрелки: 1 – Q-всплеск, 2 – предварительный импульс, 3 – главный импульс внезапного начала магнитной бури SSC*)

Координаты обсерваторий, тип приборов и частоты квантования

№ п/п	Название станции	Географическая широта, градусов	Географическая долгота, градусов	Тип магнитометра / частота дискретизации, Гц
1	Lovozero (LOZ)	67,97	35,08	Индукционный / 40
2	Barensburg (BAB)	58,03	38,33	Индукционный / 40
3	Uzur (UZR)	47,54	106,53	Индукционный / 64
4	Norilsk (NOR)	69,35	88,19	Индукционный / 64
5	Mondy (MND)	51,42	100,51	Индукционный / 64
6	Paratunka (PET)	52,94	158,25	Индукционный / 64
7	Thief River Falls (THRF)	48,02	263,63	Индукционный / 20
8	Ministik Lake (MSTK)	53,35	247,03	Индукционный / 20 Феррозондовый / 1
9	Rabbit Lake (RABB)	58,22	256,32	Индукционный / 20 Феррозондовый / 1
10	Island Lake (ISLL)	53,86	265,34	Индукционный / 20 Феррозондовый / 1
11	Dawson (DAWS)	64,05	220,89	Индукционный / 20 Феррозондовый / 1
12	Fort Smith (FSMI)	60,02	248,05	Индукционный / 20 Феррозондовый / 1
13	Fort Churchill (FCHU, FCC)	58,76	265,92	Индукционный / 20 Феррозондовый / 1
14	Pinava (PINA)	50,20	263,96	Индукционный / 20 Феррозондовый / 1
15	Ivalo (IVA)	68,56	27,29	Индукционный / 40
16	Sodankyla (SOD)	67,42	26,39	Индукционный / 40
17	Rovaniemi (ROV)	66,78	25,94	Индукционный / 40
18	Oulu (OUL)	64,52	27,23	Индукционный / 40
19	Nurmiyarvi (NUR)	60,50	24,65	Индукционный / 40

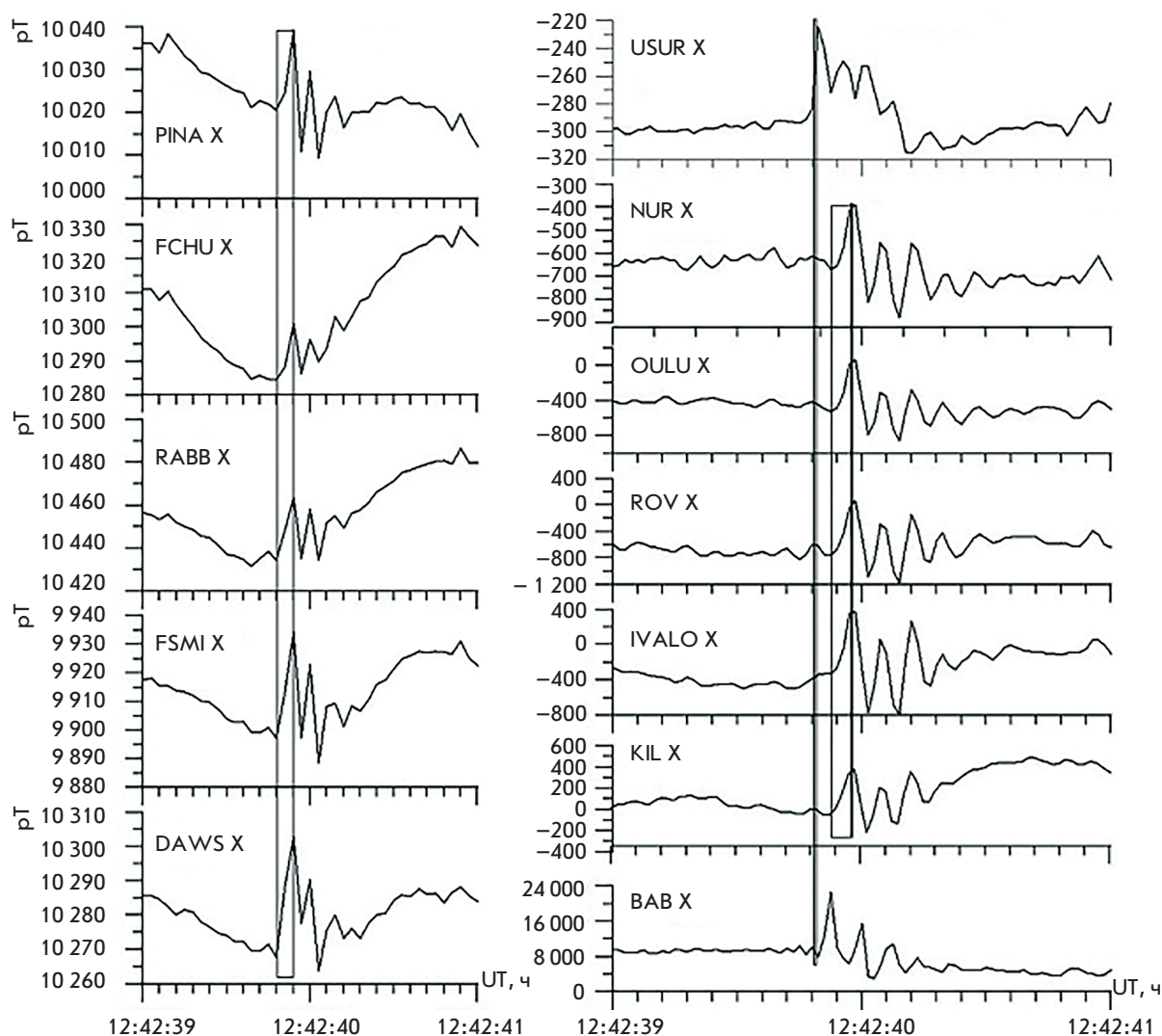


Рис. 5. Фрагменты осциллограмм Q-всплеска от 9 сентября 2011 г. на сети обсерваторий

Баренцбург находится на долготе $15,82^\circ$, а станции финской цепочки — в диапазоне долгот $25\text{--}27^\circ$. Разность по широте между Баренцбургом и Ивало составляет $\sim 10^\circ$. В то же время на всех канадских станциях начало всплеска по времени совпадает со среднеширотными станциями Узур и Монды. Однако характер амплитудной модуляции всплеска существенно различен. На среднеширотных станциях передний фронт импульса практически прямоуголен, что может служить предположением о близости этих станций к источнику, а на канадских и финских станциях нарастание амплитуды до максимума происходит за конечное время. Максимальная амплитуда на обсерватории Монды составила $0,08$ нТ, в то время как на канадских станциях на ночной стороне она изменяется в пределах $0,03$ нТ.

Рассмотрим динамические спектры всплеска на дневной (рис. 6) и ночной сто-

ронах (рис. 7). Прежде всего обращает на себя внимание различие спектров на низкоширотных и высокоширотных обсерваториях дневной стороны (см. рис. 6). На среднеширотных обсерваториях (см. рис. 3) отчетлива видна структура с резонансным спектром (СРС) [11]. Максимумы в спектре приходятся на частоты $0,5, 1,4, 4,7, 9,1, 16,4$ Гц, но частоты максимальной интенсивности различаются на обсерваториях и по компонентам магнитометров. Различна и ширина спектра: в Мондах и Узуре нижняя частота составила $\sim 0,5$ Гц, а верхняя — около 30 Гц. На станциях финской цепочки нижняя частота в спектре меняется от станции к станции, а верхняя частота определяется частотой квантования и не превышает 10 Гц. Просматривается СРС особенно в верхних частотах, где наблюдается усиление энергии в частотном диапазоне $7\text{--}10$ Гц.

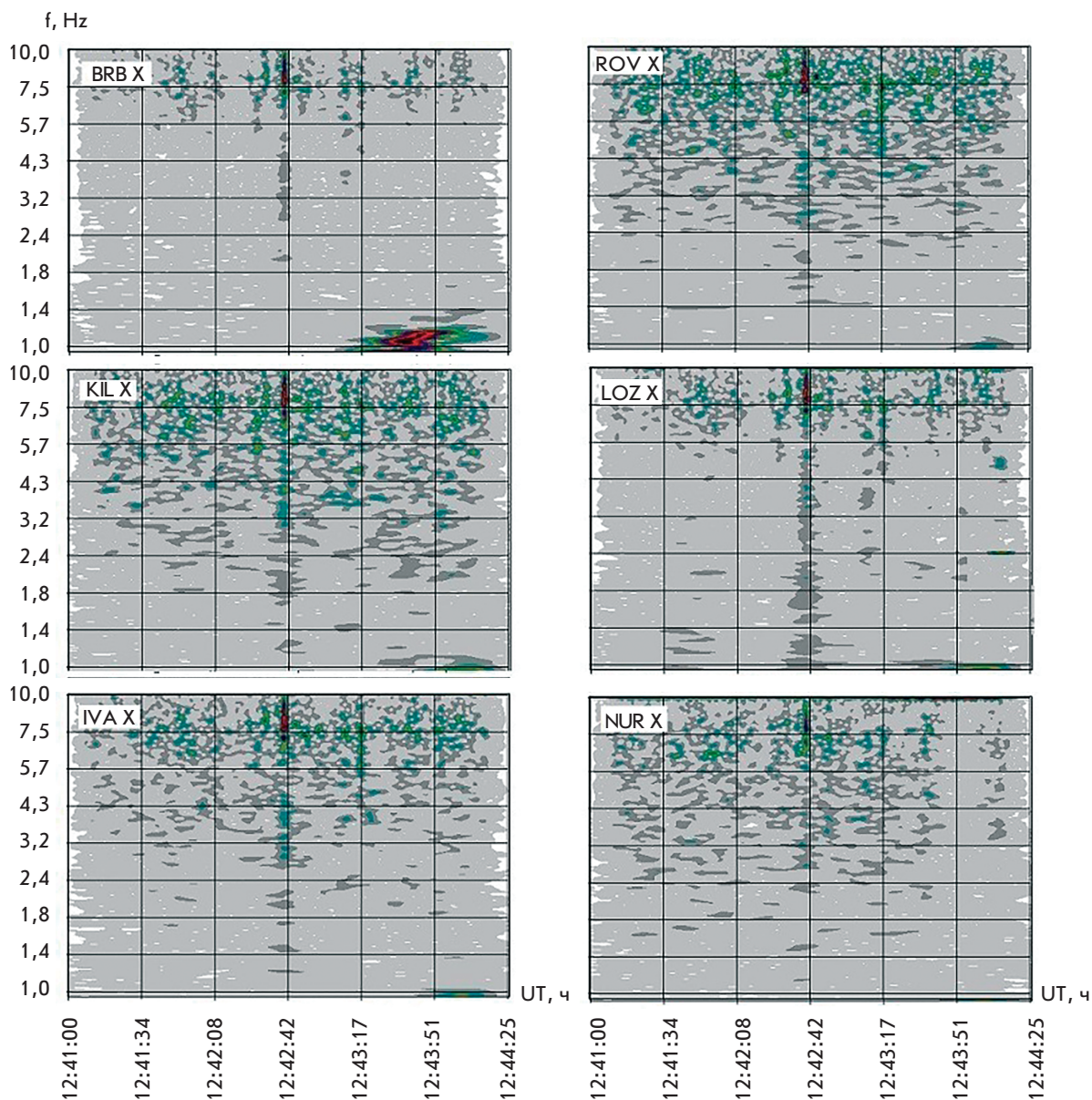


Рис. 6. Спектрограммы Q-всплеска, полученные 9 сентября 2011 г. по данным индукционных магнитометров финской сети обсерваторий в околополуденные часы

Спектры станций ночной стороны по виду ближе к спектрам среднеширотных станций, но верхние частоты не достигают 10 Гц.

На рис. 8 приведены энергетические спектры среднеширотной станции Узур и двух высокоширотных станций на ночной стороне магнитосферы. Можно отметить подобие спектров и максимум на частоте шумановского резонанса (7,8 мГц). В низкочастотной области наблюдается три максимума на частотах $\sim 2,8$; 3,0 и 3,8 мГц.

Закключение

Если наблюдения интерпретированы правильно и действительно наблюдается

Q-всплеск, то его параметры отличаются от параметров, приводимых в литературе.

Первое отличие заключается в глобальной регистрации всплеска в северном полушарии с сохранением амплитудно-временной формы всплеска на высоких широтах дневной и ночной стороны и отличный тип амплитудной модуляции на средних широтах.

Главный вопрос заключается в том, носит ли случайный характер или имеет причины совпадение начала регистрации всплеска с резким возрастанием динамического давления солнечного ветра на фронте МУВ или ее осцилляторной структуры [12].

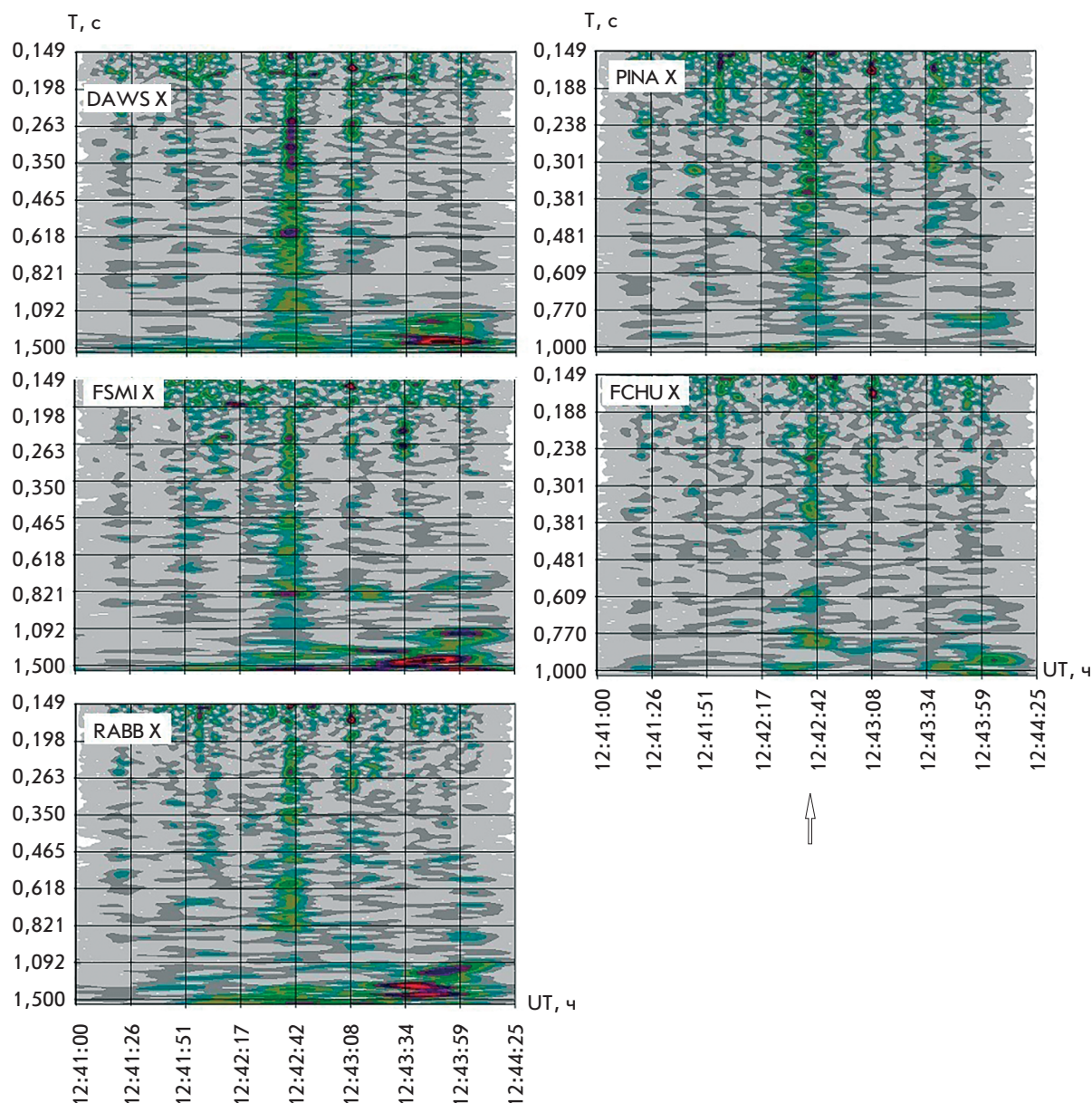


Рис. 7. Спектрограммы Q-всплеска, полученные 9 сентября 2011 г. по данным сети индукционных магнитометров CARISMA в ночные часы

Примечание: Видна СРС, но частоты спектральных максимумов отличаются от частот спектров максимумов, зафиксированных обсерваториями в утренние и вечерние часы.

Аргументами в пользу причинной связи могут служить глобальность наблюдения, длительность всплеска, характер распределения энергии в спектре и сходство с другими событиями взаимодействия МУВ с магнитосферой, в которых всплески геомагнитных пульсаций имели СРС.

Общий вывод

Исследованный Q-всплеск имеет традиционный источник генерации — грозовой разряд, по времени совпавший с приходом МУВ. Возмущение магнитосферы, вызванное

столкновением с МУВ, привело к усилению Q-всплеска и изменению его параметров. Причина генерации Q-всплеска — изменение электродинамических свойств системы «магнитопауза — ионосфера — Земля», возникновение мощного электрического разряда и красного спрайта.

Благодарности

Авторы благодарят руководителей, разработчиков приборов и руководителей экспериментов, проводимых на спутниках ACE, WIND, Geotail, THEMIS, за возмож-

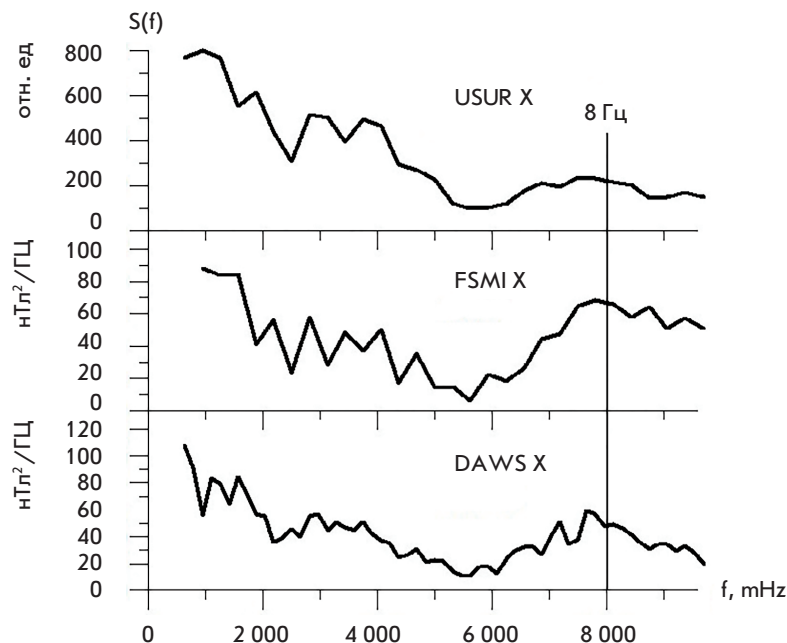


Рис. 8. Энергетические спектры Q -всплесков, зафиксированные 9 сентября 2011 г. на среднеширотной станции Узур и двух высокоширотных станциях (FSMI, DAWS) на ночной стороне магнитосферы

ность использования данных базы https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public. Авторы выражают благодарность I.R. Mann, D.K. Milling [13; 14] и другим работникам команды CARISMA за использование данных <http://carisma.ca/carisma-data-repository> (CARISMA управляется Университетом Альберты, финансируется Канадским космическим агентством). Авторы благодарят также сотрудника Института космических исследований Г.Н. Застенкера за возможность использования данных спутника

«Спектр-Р». Данные индукционных магнитометров обсерваторий Узур и Монды получены с использованием оборудования магнитометрического комплекса Центра коллективного пользования «Ангара» Института солнечно-земной физики СО РАН, данные обсерватории Баренцбург — Полярным геофизическим институтом (<http://pgia.ru>), а данные финской сети индукционных магнитометров — Геофизической обсерваторией Соданкюля университета Оулу (<http://sgo.fi>).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ogawa T. Analysis of Q Burst Waveforms / T. Ogawa, M. Komatsu // *Radio Science*. — 2007. — Vol. 42, iss. 2. — URL: <https://doi.org/10.1029/2006RS003493>.
2. Q-bursts: A Comparison of Experimental and Computed ELF Waveforms / A.P. Nikolaenko, M. Hayakawa, T. Ogawa, M. Komatsu. — DOI 10.1029/2008RS003838 // *Radio Science*. 1967. — Vol. 4, iss. 4. — URL: https://www.researchgate.net/publication/251428483_Q-bursts_A_comparison_of_experimental_and_computed_elf_waveforms.
3. Ogawa T. Polarity of Q-bursts / T. Ogawa // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2002. — No. 22. — P. 35–41.
4. Sprites, ELF Transients and Positive Ground Strokes / D.J. Boccippio, E.R. Williams, S.J. Heckman [et al.]. — DOI 10.1126/science.269.5227.1088 // *Science*. — 1995. — Vol. 269. — P. 1088–1091.
5. Sentman D.D. Observations of Upper Atmospheric Optical Flashes Recorded from Aircraft / D.D. Sentman, E.M. Wescott. — DOI 10.1029/93GL02998 // *Geophysical Research Letters*. — 1993. — Vol. 20, no. 24. — P. 2857–2860.
6. Criteria for Sprites and Elves Based on Schumann Resonance Observations / E. Huang, E. Williams, R. Boldi [et al.]. — DOI 10.1029/1999JD900139 // *Journal of Geophysical Research*. — 1999. — Vol. 104, iss. D14. — P. 16943–16964.
7. Jones D. The Nature and Average Magnitude of the Sources of Transient Excitation of Schumann Resonances / D. Jones, D. Kemp. — DOI 10.1016/0021-9169(71)90058-4 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 1971. — Vol. 33, no. 4. — P. 557–566.
8. Paras M.K. Electrical Parameters of Red Sprites / M.K. Paras, J. Rai // *Atmosfera*. — 2012. — Vol. 25, iss. 4. — P. 371–380.
9. Schekotov A. ULF Impulsive Magnetic Response at Mid-Latitudes to Lightning Activity / A. Schekotov, F.V. Pilipenko, A.N. Fedorov. — DOI 10.5047/eps.2010.12.009 // *Earth Planets and Space*. — 2011. — Vol. 63, no. 2. — P. 119–128.

10. Curto J.J. Evolution of Concept of Sudden Storm Commencement and their Operative Identification / J.J. Curto, T. Araki, L.F. Alberca. — DOI 10.1186/BF03352059 // *Earth Planets Space*. — 2007. — Vol. 59, iss. 11. — P. i–xii.

11. Два типа отклика в геомагнитных пульсациях на взаимодействие с магнитосферой МУВ / В.А. Пархомов, Н.Л. Бородкова, А.В. Яхнин [и др.]. — DOI 10.12737/szf-43201808 // *Солнечно-земная физика*. — 2018. — Т. 4, № 3. — С. 68–83.

12. Пархомов В.А. О тонкой структуре предварительного импульса внезапного начала магнитных бурь / В.А. Пархомов // *Геомагнетизм и аэронавигация*. — 1985. — Т. 25, № 3. — С. 420–424.

13. The Upgraded CARISMA Magnetometer Array in the THEMIS Era / I.R. Mann, D.K. Milling, I.J. Rae [et al.]. — DOI 10.1007/s11214-008-9457-6 // *Space Science Reviews*. — 2008. — Vol. 141. — P. 413–451.

14. Nickolaenko A.P. A Modified Technique to Locate the Sources of ELF Transient Event / A.P. Nickolaenko, I.G. Kudintseva. — DOI 10.1016/0021-9169(94)90116-3 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 1994. — Vol. 56. — P. 1493–1498.

REFERENCES

1. Ogawa T., Komatsu M. Analysis of Q Burst Waveforms. *Radio Science*, 2007, vol. 42, iss. 2. Available at: <https://doi.org/10.1029/2006RS003493>.

2. Nickolaenko A.P., Hayakawa M., Ogawa T., Komatsu M. Q-bursts: A Comparison of Experimental and Computed ELF Waveforms. *Radio Science*, 1967, vol. 4, iss. 4. DOI: 10.1029/2008RS003838.

3. Ogawa T. Polarity of Q-bursts. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, no. 22, pp. 35–41.

4. Boccippio D.J., Williams E.R., Heckman S.J., Lyons W.A., Baker I.T., Boldi R. Sprites, ELF Transients and Positive Ground Strokes. *Science*, 1995, vol. 269, pp. 1088–1091. DOI: 10.1126/science.269.5227.1088.

5. Sentman D.D., Wescott E.M. Observations of Upper Atmospheric Optical Flashes Recorded from Aircraft. *Geophysical Research Letters*, 1993, vol. 20, no. 24, pp. 2857–2860. DOI: 10.1029/93GL02998.

6. Huang E., Williams E., Boldi R., Heckman S., Lyon W., Taylor M., Nelson T., Wong C. Criteria for Sprites and Elves Based on Schumann Resonance Observations. *Journal of Geophysical Research*, 1999, vol. 104, iss. D14, pp. 16943–16964. DOI: 10.1029/1999JD900139.

7. Jones D., Kemp D. The Nature and Average Magnitude of the Sources of Transient Excitation of Schumann Resonances. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1971, vol. 33, no. 4, pp. 557–566. DOI: 10.1016/0021-9169(71)90058-4.

8. Paras M.K., J. Rai. Electrical Parameters of Red Sprites. *Atmosfera*, 2012, vol. 25, iss. 4, pp. 371–380.

9. Schekotov A., Pilipenko F.V., Fedorov A.N. ULF Impulsive Magnetic Response at Mid-Latitudes to Lightning Activity. *Earth Planets and Space*, 2011, vol. 63, no. 2, pp. 119–128. DOI: 10.5047/eps.2010.12.009.

10. Curto J.J., Araki T., Alberca L.F. Evolution of Concept of Sudden Storm Commencement and their Operative Identification. *Earth Planets Space*, 2007, vol. 59, iss. 11, pp. i–xii. DOI: 10.1186/BF03352059.

11. Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Yahnin A.G., Tero R., Tsegmed B. Magnetospheric Response of two Types in PSC Geomagnetic Pulsations to Interaction with Interplanetary Shock Waves. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 68–83. (In Russian). DOI: 10.12737/szf-43201808.

12. Parkhomov V.A. On the fine structure of the preliminary impulse of the sudden onset of magnetic storms. *Geomagnetizm i aeronomiya = Geomagnetism and Aeronomy*, 1985, vol. 25, no. 3, pp. 420–424. (In Russian).

13. Mann I.R., Milling D.K., Rae I.J., Ozeke L.G., Kale A. The Upgraded CARISMA Magnetometer Array in the THEMIS Era. *Space Science Reviews*, 2008, vol. 141, pp. 413–451. DOI: 10.1007/s11214-008-9457-6.

14. Nickolaenko A.P., Kudintseva I.G. A Modified Technique to Locate the Sources of ELF Transient Events. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1994, vol. 56, pp. 1493–1498. DOI: 10.1016/0021-9169(94)90116-3.

Информация об авторах

Пархомов Владимир Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: pekines_41@mail.ru.

Сафаргалеев Владимир Ваисович — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории наземных геомагнитных исследований, Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vladimir.safargaleev@pgia.ru.

Рахматулин Равиль Анатольевич — доктор физико-математических наук, заведующий комплексной магнитно-ионосферной обсерваторией, Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация.

Authors

Vladimir A. Parkhomov — D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: pekines_41@mail.ru.

Vladimir V. Safargaleev — D.Sc. in Physics and Mathematics, Chief Researcher, Laboratory of Ground Geomagnetic Research, St. Petersburg Branch of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, the Russian Federation, e-mail: vladimir.safargaleev@pgia.ru.

Ravil A. Rakhmatulin — D.Sc. in Physics and Mathematics, Head of the Integrated Magnetic-Ionospheric Observatory, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation.

Leonid V. Kazantsev — Senior Lecturer, Department of Mathematical Methods and Digital Technolo-

Казанцев Леонид Викторович — старший преподаватель, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: kazantsevlv@bgu.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования

Q-всплески, генерируемые при контакте межпланетной ударной волны с магнитосферой / В.А. Пархомов, В.В. Сафаргалеев, Р.А. Рахматулин, Л.В. Казанцев. — DOI 10.17150/2500-2759.2022.32(1).170-180 // Известия Байкальского государственного университета. — 2022. — Т. 32, № 1. — С. 170–180.

gies, Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: kazantsevlv@bgu.ru.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

For Citation

Parkhomov V.A., Safargaleev V.V., Rakhmatulin R.A., Kazantsev L.V. Q-Bursts Generated by the Contact of the Interplanetary Shock Wave with the Magnetosphere. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2022, vol. 32, no. 1, pp. 170–180. (In Russian). DOI: 10.17150/2500-2759.2022.32(1).170-180.