
СПУТНИКОВЫЕ И НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ Pc1-ПУЛЬСАЦИЙ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ В МАРТЕ 2023 Г.

SATELLITE AND GROUND-BASED OBSERVATIONS OF Pc1 PULSATIONS DURING A MAGNETIC STORM IN MARCH 2023

Д.Д. Позднякова

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, d_pozdnyakova@live.ru
Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия*

В.А. Пилипенко 

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, pilipenko_va@mail.ru*

М. Носэ

*Нагойский городской университет,
Нагоя, Япония, nose.masahito@gmail.com*

С.Ю. Хомутов

*Институт космофизических исследований
и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Россия, khomutov@ikir.ru*

Д.Г. Баишев 

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, baishev@ikfia.ysn.ru*

D.D. Pozdnyakova

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, d_pozdnyakova@live.ru
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia*

V.A. Pilipenko

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, pilipenko_va@mail.ru*

M. Nose

*Nagoya City University,
Nagoya, Japan, nose.masahito@gmail.com*

S.Yu. Khomutov

*Institute of Cosmophysical Researches
and Radio Wave Propagation FEB RAS,
Paratunka, Russia, khomutov@ikir.ru*

D.G. Baishev

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, baishev@ikfia.ysn.ru*

Аннотация. Проанализированы электромагнитные ионно-циклотронные колебания диапазона Pc1 (~1 Гц), зарегистрированные на восстаной фазе магнитной бури 25 марта 2023 г. сетью наземных станций на Дальнем Востоке и низкоорбитальными спутниками SWARM, проходящими над станциями. Собранные данные позволили проследить распространение Pc1-волн через ионосферу к земной поверхности и вдоль ионосферы. В то время как на наземных станциях наблюдалось длительное (~1 ч) узкополосное излучение, на спутниках был зарегистрирован только короткий всплеск поперечных колебаний длительностью ~40 с. Оценка когерентности сигналов между близкими спутниками SWARM-A и -C, разнесенными по долготе на ~1°, дает величину поперечного масштаба волнового пакета в ионосфере ~90 км. Большая длительность излучения на наземных станциях обусловлена волноводным распространением сигналов вдоль ионосферы, в результате которого станция «собирает» сигналы из большой магнитосферной области. Наличие волноводного распространения подтверждается ориентацией эллипса поляризации наземных Pc1-пульсаций относительно места инъекции волн в ионосферу. Высказана гипотеза, что ионно-циклотронная неустойчивость развивается в виде локализованных и непродолжительных всплесков, но механизм такого режима остается невыясненным.

Ключевые слова: Pc1-пульсации, электромагнитные ионно-циклотронные волны, спутники SWARM.

Abstract. We have analyzed electromagnetic ion-cyclotron oscillations of the Pc1 range (~1 Hz) recorded during the recovery phase of the March 25, 2023 magnetic storm at the network of ground stations in the Far East and at low-orbit SWARM satellites passing over the stations. The collected data made it possible to trace propagation of Pc1 waves through the ionosphere to Earth's surface and along the ionosphere. While long-term (~1 hour) narrowband pulsations were observed at ground stations, satellites recorded only a short (~40 s) burst of transverse oscillations. Estimated coherence of signals between close SWARM-A and -C satellites, separated by ~1° longitude, gives a transverse scale of the wave packet in the ionosphere equal to ~90 km. The long duration of pulsations at ground stations is caused by waveguide propagation of signals along the ionosphere due to which the station "collects" signals from a large magnetospheric region. The presence of waveguide propagation is confirmed by the orientation of the polarization ellipse of ground-based Pc1 pulsations relative to the site of injection of waves into the ionosphere. It is hypothesized that ion-cyclotron instability develops in the form of localized and short-lived bursts, but the mechanism of such a regime remains unclear.

Keywords: Pc1 pulsations, electromagnetic ion-cyclotron waves, SWARM satellites.

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные ионно-циклотронные (ЭМИЦ) волны в диапазоне геомагнитных пульсаций Pc1 (от долей герц до единиц герц) наблюдаются с помощью наземных и спутниковых магнитометров на протяжении десятилетий. Принципиальные вопросы их физической природы и механизма генерации считаются решенными: ЭМИЦ-волны генерируются вблизи экваториальной плоскости магнитосферы в результате резонансного взаимодействия с протонами кольцевого тока с энергией 10–100 кэВ [Horne, Thorne, 1994; Gary et al., 1995]. Если предполагать распределение энергичных протонов по энергии бимаксвелловским с продольной T_{\parallel} и поперечной T_{\perp} температурами, то кинетическая ЭМИЦ-неустойчивость развивается при положительной анизотропии $A = T_{\perp}/T_{\parallel} - 1 > 0$. Неустойчивыми будут волны с конечным отношением частоты к гирочастоте протонов $\omega/\Omega \leq 1$, имеющие круговую левую поляризацию в области нормального эффекта Доплера (в неподвижной системе отсчета волны и частицы движутся навстречу друг другу). Необходимая для развития неустойчивости анизотропия $A > 0$ возникает либо при инжекции протонов вглубь магнитосферы с последующим бетатронным ускорением [Kangas et al., 1998], либо при поджати магнитосферы импульсами динамического давления солнечного ветра [Engbreton et al., 2002; Usanova et al., 2008]. Инкремент нарастания ЭМИЦ-волн становится заметным при условии $u_i \gg V_A$, где u_i — тепловая скорость ионов, V_A — альфвеновская скорость, т. е. при достаточно плотной фоновой плазме [Арцимович, Сагдеев, 1979]. Таким образом, благоприятные условия развития этой неустойчивости возникают либо внутри плазмосферы, где высока концентрация холодной плазмы [Hu, Fraser, 1994], либо за пределами геосинхронной орбиты, где мало магнитосферное магнитное поле [Hansen et al., 1992]. Спутниковые исследования показывают, что пульсации Pc1 действительно наблюдаются как во внешней магнитосфере ($L > 7$) в дневное время, так и во внутренней ($L < 4$) в вечерние часы [Anderson et al., 1992; Keika et al., 2013].

Наблюдения показывают, что ЭМИЦ-неустойчивость может развиваться в разных режимах и механизмы формирования таких режимов остаются невыясненными [Трахтенгерц, Райкрофт, 2011]. Обычно считается, что ЭМИЦ-неустойчивость протонов кольцевого тока конвективная, т. е. область неустойчивости в вершине силовой линии работает как усилитель бегущих ЭМИЦ-волн [Horne, Thorne, 1993]. Сами волновые пакеты при этом осциллируют между отражающими сопряженными ионосферами и испытывают усиление при каждом проходе через экваториальную область магнитосферы (модель BWP — Bouncing Wave Packet) [Гульельми, 1979]. Эта модель призвана объяснить специфический тип Pc1-излучений — «жемчужины», представляющие собой регулярную последовательность волновых пакетов, попеременно появляющихся в геомагнитно-сопря-

женных точках. Однако эта модель вызывает все большие сомнения [Mursula et al., 2007], в частности, не наблюдается предсказываемое моделью удвоение частоты появления пакетов ЭМИЦ-волн на геостационарном спутнике по сравнению с сопряженной наземной станцией [Usanova et al., 2008]. Генератором жемчужин может быть ЭМИЦ-неустойчивость в режиме лампы обратной волны [Trakhtengerts, Demekhov, 2007]. Положительная обратная связь в этом режиме возникает за счет взаимодействия ЭМИЦ-волны с модулированным пучком частиц. При этом в зависимости от плотности пучка эта абсолютная неустойчивость может существовать как в режиме непрерывной генерации, так и в пульсирующем режиме [Demekhov, 2007].

Большая же часть Pc1-пульсаций наблюдается в виде непрерывного узкополосного излучения, т. е. генерируется абсолютной неустойчивостью. В многокомпонентной плазме с примесью тяжелых ионов (He^+ , O^+) в той области, где частота волнового пакета равна перекрестной частоте, может происходить инверсия поляризации, частичное отражение и поглощение волны [Rauch, Roux, 1982; Johnson, Cheng, 1999; Mikhailova et al., 2012]. При достаточно высокой концентрации тяжелых ионов ЭМИЦ-волны даже могут запереться вблизи экваториальной плоскости магнитосферы [Guglielmi et al., 2000]. В диапазоне частот Pc1 в магнитосфере регистрируются также так называемые ион-ионные гибридные моды, распространяющиеся поперек магнитных оболочек [Михайлова и др., 2022]. В результате в многокомпонентной плазме ЭМИЦ-волны могут быть заперты не только вдоль силовой линии, но и поперек, в области с локальным минимумом радиального профиля альфвеновской скорости [Mikhailova et al., 2014].

После генерации ЭМИЦ-волны распространяются вдоль силовых линий магнитного поля, достигая ионосферы и в конечном счете, земной поверхности. При приближении к ионосфере отношение ω/Ω становится настолько малым, что падающие на ионосферу Pc1-волны можно рассматривать как магнитогидродинамические (МГД) моды. Внутри ионосферы ЭМИЦ-волна частично преобразуется в быструю магнитозвуковую (БМЗ) моду, которая может переноситься вдоль ионосферного волновода на расстояния до тысячи километров от места инжекции волны в ионосферу [Kim et al., 2010]. Таким образом, ионосфера действует как большая приемная антенна, собирающая на одной станции магнитосферные ЭМИЦ-сигналы с большой площади. При волноводном распространении Pc1-пульсаций их спектральный состав на удаленных станциях обрезается снизу на частоте отсечки — критической частоте ионосферного волновода. Моделирование взаимодействия ЭМИЦ-волн с ионосферой предсказывает, что в области источника наземный отклик должен быть преимущественно сформирован полем волны альфвеновского типа, падающей из магнитосферы вдоль силовых линий [Fujita, Tamao, 1988]. На низких широтах волновое поле должно быть обусловлено в основном распространяющейся вдоль ионосферного

Информация о наземных станциях

Станция	Код	Широта	Долгота	Геомагнитная широта	Геомагнитная долгота	Институт	Чувствительность на частоте 1 Гц, В/нТл
Yakutsk	YAK	62.02	129.72	56.2	200.5	ИКФИА	H, D: 0.19376
Magadan	MGD	60.05	150.73	51.9	213.2	ИКИР	H: 0.247 D: 0.253
Paratunka	PTK	52.97	158.28	45.8	221.4	ИКИР	H: 0.243 D: 0.246
Moshiro	MSR	44.37	142.27	35.6	209.5	ISEE	H: 10.279 D: 10.501
Rikubetsu	RIK	43.46	143.77	34.7	210.8	ISEE	H, D: 0.459
Sata	STA	31.02	130.68	21.2	200.5	ISEE	H: 0.161 D: 0.163

волновода БМЗ-волной. Это приводит к тому, что поляризация Pc1-колебаний в горизонтальной плоскости на разном удалении от места падения волны на ионосферу должна различаться [Fedorov et al., 2018]. В целом, свойства волн Pc1 на Земле определяются процессами генерации в приэкваториальной плоскости магнитосферы, распространения через магнитосферную плазму вдоль силовых линий до верхней ионосферы, ионосферного распространения и прохождения через ионосферу к Земле.

Мы попытались проследить и проанализировать процесс распространения Pc1-волн через ионосферу и вдоль нее по данным низкоорбитальных спутников и сети наземных станций.

ДАННЫЕ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Мы проанализировали данные сети индукционных трехкомпонентных магнитометров, расположенных на Дальнем Востоке и в Японии на геомагнитных широтах $\sim 20^{\circ}$ – 56° N. Большая часть этих станций является частью проекта PWING Нагойского университета [Shiokawa et al., 2017]. Географические и геомагнитные координаты станций даны в таблице, карта с положением станций показана на рис. 1. Горизонтальные компоненты B_x и B_y ориентированы в направлениях Ю-С и З-В соответственно. Поскольку у каждой станции свои частотная характеристика и чувствительность, напрямую сравнивать амплитуды на разных станциях мы не можем и поэтому сопоставляем волновые формы, спектральный состав и поляризацию колебаний. Однако, поскольку будет рассматриваться узкополосное излучение с центральной частотой ~ 1 Гц, амплитуду можно приближенно оценить, вводя коэффициенты конверсии из вольт в нанотесла на частоте 1 Гц, приведенные на сайте [https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/magne/magne_stations.html]. Значения коэффициентов даны в таблице отдельной колонкой.

Для зарегистрированных волновых событий над цепочкой станций проходила орбита спутников проекта SWARM [https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm]. Три идентичных спутника SWARM-A, -B, -C работают на почти круговой околополярной (наклонение 87.3°) орбите в следующей конфигурации: спутники А и С летят бок о бок с разнесом по долготе $\sim 1^{\circ}$ на высоте 460 км, орбита спутника В проходит на высоте 530 км. Спут-

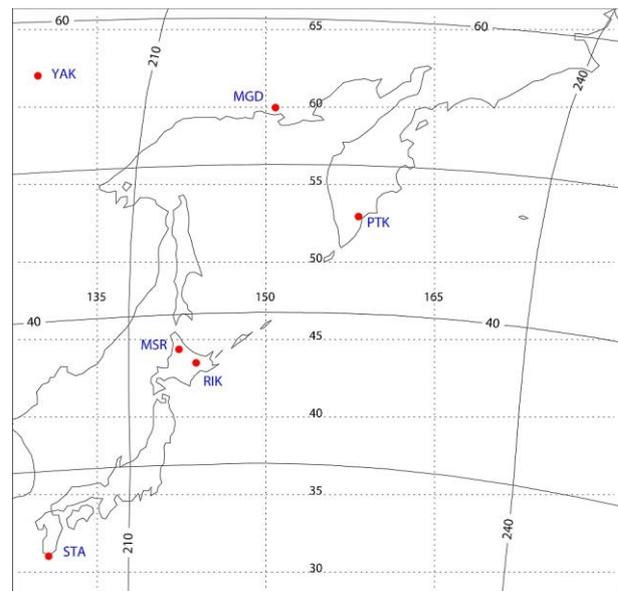


Рис. 1. Положение станций сети PWING. Сетка географических и геомагнитных координат показана пунктирными и сплошными линиями

ники SWARM оснащены трехкомпонентным векторным магнитометром VFM (Vector Field Magnetometer) с частотой опроса 50 Гц, зондом Ленгмюра для измерения плотности плазмы (частота регистрации 2 Гц) и другой аппаратурой. Исходные данные магнитометра даны в системе координат NEC (North-East-Center): компоненты N и E лежат в горизонтальной плоскости, указывая соответственно на север и восток, C указывает на центр Земли. Данные магнитометра были преобразованы в координатную систему MFA (Mean Field Aligned), ориентированную B в результате вдоль текущего геомагнитного поля B_0 , которое направлено из Южного полушария в Северное. поле возмущения разделяется на продольную компоненту B_z , совпадающую по направлению с B_0 , и поперечные $B_{\perp} = \{B_x, B_y\}$ компоненты: ось Y перпендикулярна магнитному меридиану и направлена на восток, ось X ортогональна Z и Y . Для сопоставления наземных и спутниковых данных с помощью ресурса Satellite Situational Center NASA [https://sscweb.gsfc.nasa.gov] построена проекция вдоль силовой линии на ионосферу (на высоту 100 км) орбит всех спутников миссии SWARM в исследуемых интервалах времени.

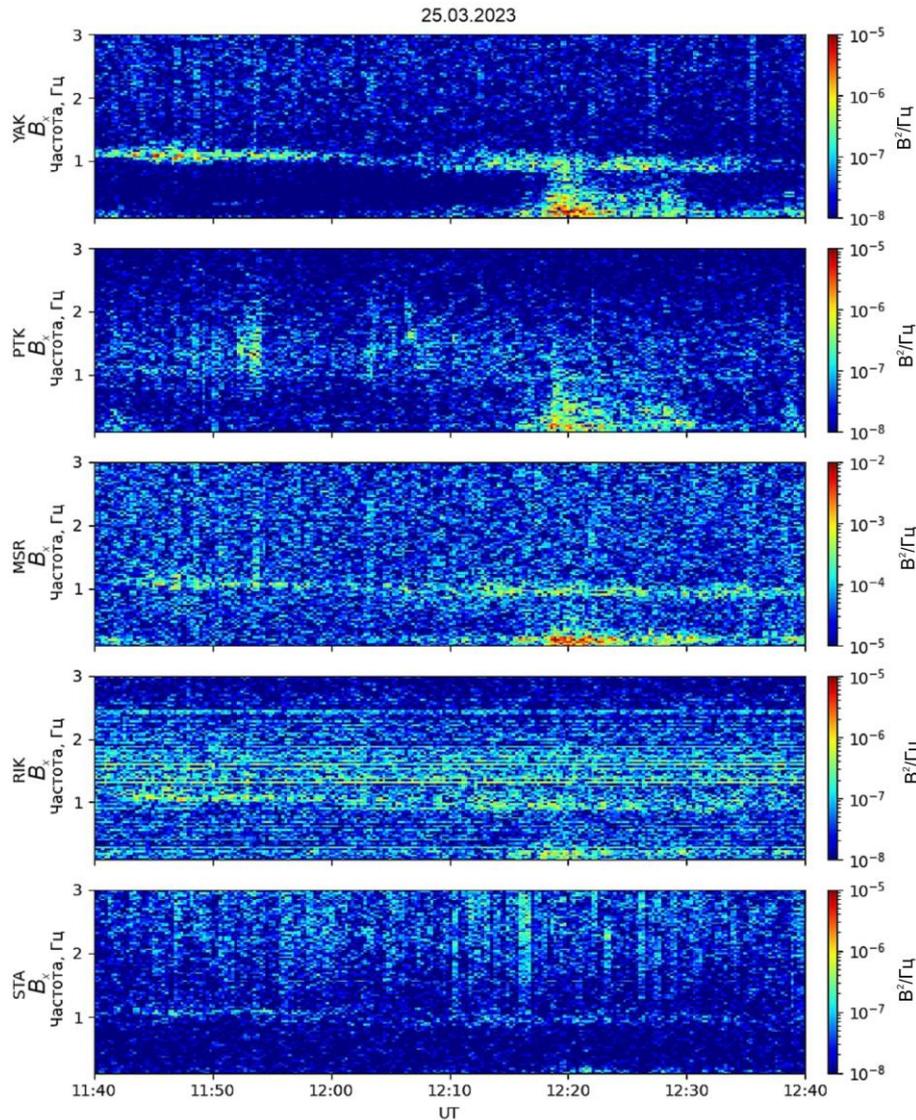


Рис. 2. Спектрограммы B_x -компоненты с цепочки станций, показанных по мере убывания широты: YAK, PTK, MSR, RIK, STA для интервала А (11:40–12:40 UT) 25.03.2023

БУРЯ 23–25 МАРТА 2023 Г.

Сильная магнитная буря началась 23 марта 2023 г. В главной фазе индекс $SUM-H$ достигал значений ~ 170 нТл. Отчетливые волновые пакеты диапазона Pc1 наблюдались только на фазе восстановления 25 марта 2023 г. на средне- и низкоширотных станциях. Для детального анализа были отобраны Pc1-пульсации в двух интервалах.

Интервал А. Длительное узкополосное (~ 1 Гц) излучение на наземных станциях наблюдалось в ночные часы в 11:40–12:40 UT (~ 21 LT для японских станций и около полуночи для Камчатки). На рис. 2 показаны спектрограммы (B_x -компонента) с цепочки станций по мере убывания их широты: YAK, PTK, MSR, RIK, STA. Сигнал на станции RIK осложнен высокочастотной помехой.

Интервал В. В 14:15–14:45 UT ($\sim 23:30$ LT для японских станций, и $\sim 02:30$ LT для Камчатки) наблюдалась наиболее отчетливая серия Pc1-пульсаций. Спектрограммы B_x -компоненты (рис. 3) показывают

наличие узкополосного излучения с центральной частотой ~ 1.3 Гц как на субавроральных станциях (MGD, YAK), так и на низкоширотных (PTK, MSR, RIK, STA).

Для каждого интервала построена карта с положением станций и геомагнитной проекцией вдоль силовой линии на нижнюю ионосферу (100 км) орбиты каждого спутника SWARM (рис. 4). В интервале А над станциями проходили спутники SWARM-A и -С, в интервале В — спутник SWARM-B. Всплеск Pc1 в ионосфере был зарегистрирован, когда проекция орбиты спутника была на геомагнитной широте $\sim 50^\circ$ между станциями YAK и MSR.

СИНХРОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПАКЕТОВ Pc1 НА СПУТНИКЕ И НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЯХ

На спутниках SWARM-A и -С были зарегистрированы Pc1-колебания на той же частоте, что и наземные Pc1-пульсации. В анализируемых интервалах спут-

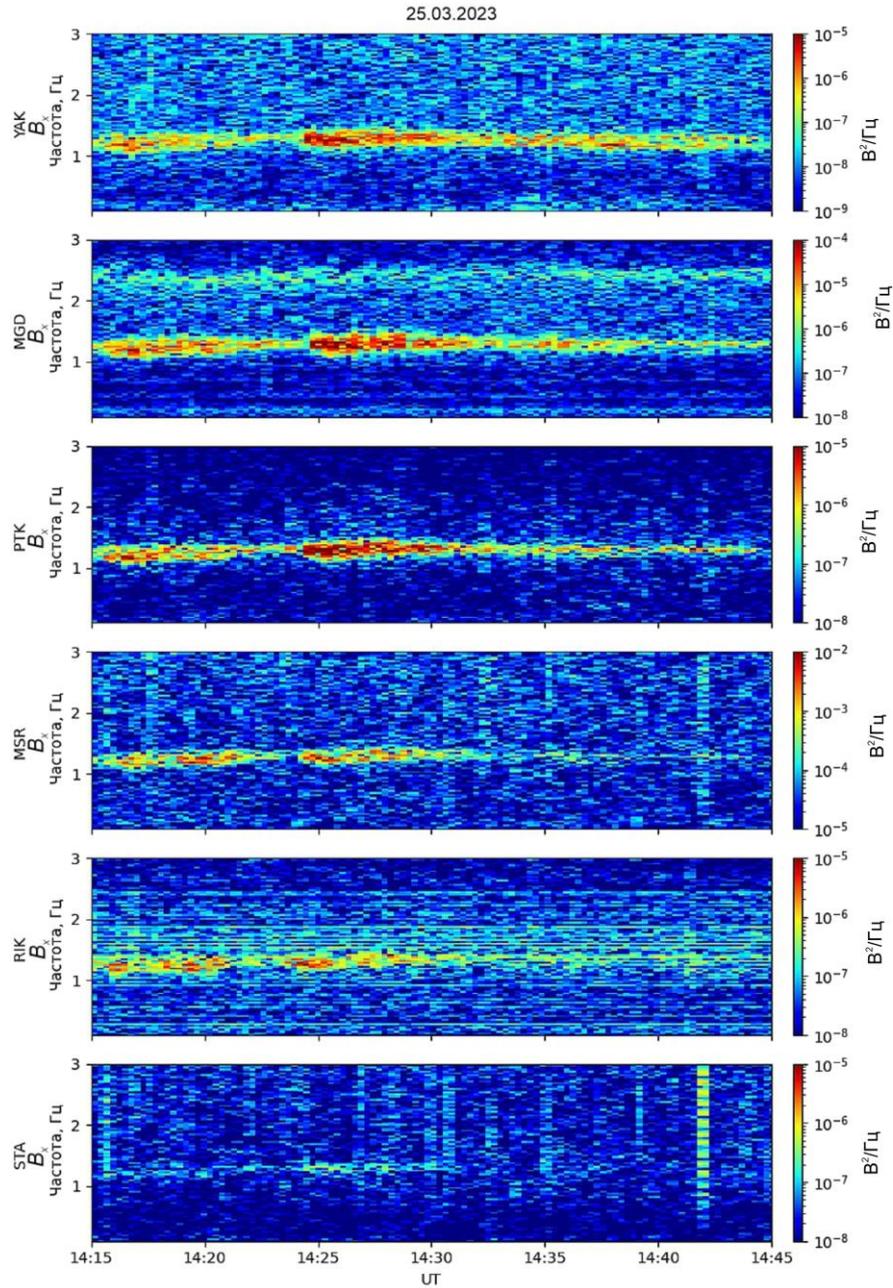


Рис. 3. Спектрограммы горизонтальной B_x -компоненты на станциях YAK, MGD, PTK, MSR, RIK, STA для интервала В (14:15–14:45 UT) 25.03.2023

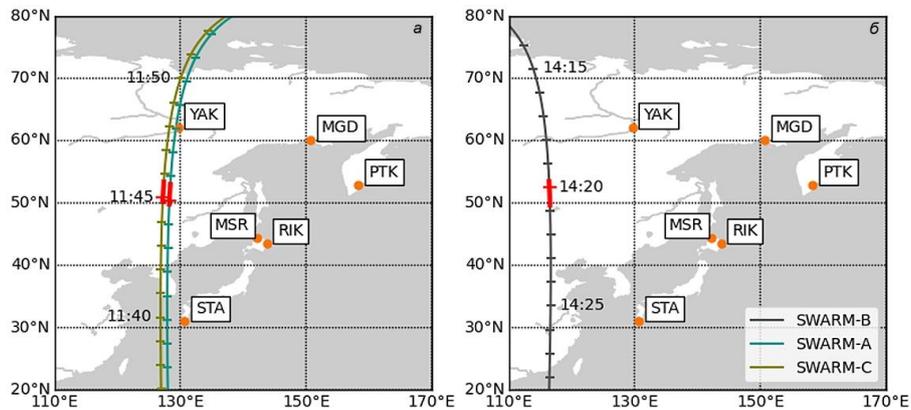


Рис. 4. Карта в географических координатах с положением станций и геомагнитной проекцией вдоль силовой линии на нижнюю ионосферу (100 км) орбиты каждого из спутников SWARM для интервалов А (а) и В (б). Красным цветом показан участок орбиты, на котором были зарегистрированы Pc1-колебания

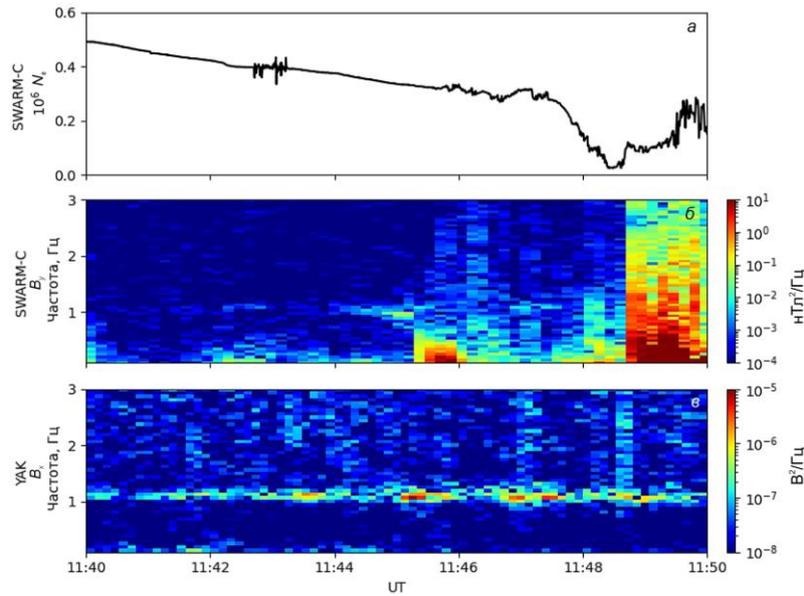


Рис. 5. Вариации плотности плазмы N_e для временного интервала А по данным ленгмюровского зонда спутника SWARM-C (а), спектрограмма магнитных колебаний (B_z -компонента) на SWARM-C (б) и спектрограмма магнитных пульсаций (B_x -компонента) станции YAK (в)

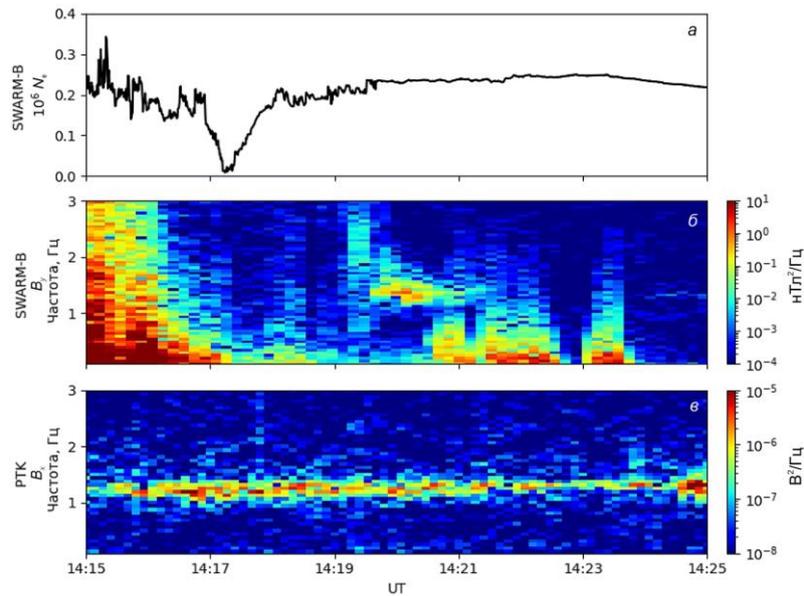


Рис. 6. Вариации плотности плазмы N_e для временного интервала В по данным ленгмюровского зонда спутника SWARM-B (а), спектрограмма магнитных колебаний на спутнике SWARM-B (б) и спектрограмма магнитных пульсаций (B_x -компонента) на станции PTK (в)

ники SWARM-A и -С проходили над станциями широтного профиля из Южного полушария в Северное. Мы сопоставили спектрограмму B_x -компоненты станции YAK со спектрограммой со спутника SWARM (B_z -компонента в MFA системе координат) для анализируемых временных интервалов А (рис. 5) и В (рис. 6).

Для представления о положении предполагаемого источника Pc1-излучения относительно плазмопаузы по данным SWARM были построены вариации плотности плазмы N_e (верхняя панель рис. 5, 6). Наблюдаемый сильный провал в N_e — так называемый плазменный провал (plasma trough) — соответствует ионосферной проекции плазмопаузы. В интервале А спутник вошел в плазменный провал в $\sim 11:48$ UT, а в ин-

тервале В — в $\sim 14:17$ UT. Таким образом, в обоих интервалах сигнал Pc1 был зарегистрирован внутри плазмосферы недалеко от плазмопаузы.

ШИРОТНАЯ СТРУКТУРА ПОЛЯ Pc1-ПУЛЬСАЦИЙ

Чтобы более детально рассмотреть изменение спектрального состава по мере распространения, были построены нормированные спектры сигналов всех станций по B_x -компоненте в интервалах А и В (рис. 7, а, б). В интервале А максимум спектра на спутнике приходится на частоту 1 Гц, а на наземных станциях спектральный максимум расщепляется на 0.95 и 1.1 Гц. В интервале В спектральный макси-

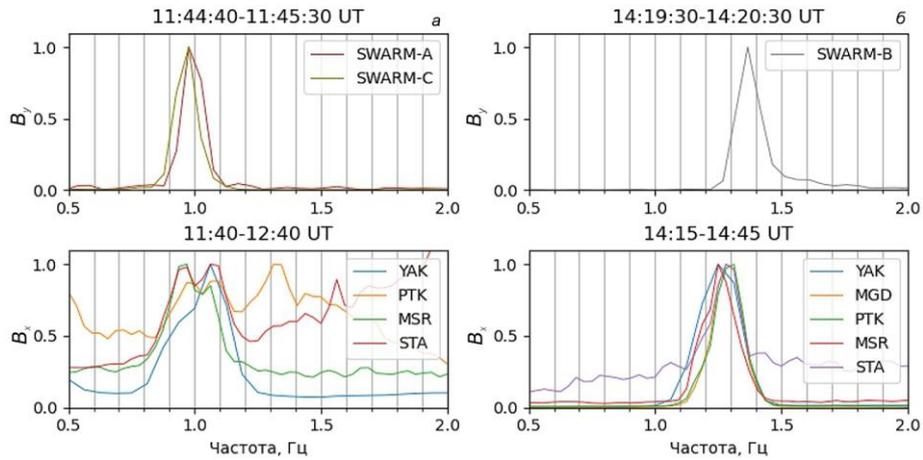


Рис. 7. Нормированные спектры B_x -компоненты всех станций отдельно в интервалах А (а) и В (б) на частотах 0.5–2.0 Гц. Вверху — спектры сигнала на соответствующих спутниках. Станция RIK исключена, так как высокочастотная помеха на ней сильно искажает вид спектра

мум на спутнике наблюдается на частоте 1.35 Гц, а на Земле — 1.3 Гц. Частота колебаний, зарегистрированных на всех наземных станциях, совпадает с частотой колебаний на спутнике и не меняется по мере распространения к низким широтам. Относительные полуширины спектра Pc1-пульсаций $\Delta f/f_{max}$ (Δf — ширина спектрального пика на половине спектрального максимума) на Земле и на спутнике составляют 0.12 и 0.07 соответственно. Малая спектральная ширина $\Delta f/f_{max} \sim 0.1$ указывает на то, что на языке физики плазмы Pc1-пульсации должны рассматриваться в приближении монохроматической волны.

Рассмотрим ориентацию эллипса поляризации. Поляризация сильно подвержена воздействию шумов и выдерживалась стабильной только на станциях YAK и MSR. Годографы вариаций магнитного поля в горизонтальной плоскости $B_x B_y$, отфильтрованные в полосе 0.5–2 Гц, показаны для интервала В. Годограф поляризации в горизонтальной плоскости для интервала 10 с в окрестности 14:20:20 UT наложен на карту с положением орбиты (рис. 8). Видно, что большая ось эллипсов поляризации на этих станциях «смотрит на эпицентр» Pc1-активности по спутниковым данным.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ СТРУКТУРА Pc1 ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В ИОНОСФЕРЕ

Для детального определения поляризации и длительности волнового пакета в ионосфере рассмотрим магнитограммы (компоненты B_x , B_y , B_z) вариаций на спутнике SWARM-C (отфильтрованные в полосе 0.1–5 Гц) в интервале А (рис. 9) и на спутнике SWARM-B в интервале В (рис. 10). В системе координат MFA продольная компонента магнитного поля волны практически отсутствует $B_z \sim 0$, т. е. колебания действительно являются поперечными. Колебания представляют собой падающие на ионосферу альфвеновские волновые пакеты, а не БМЗ-моды ионосфер-

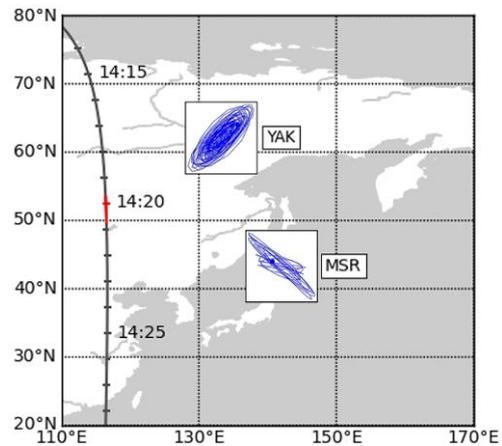


Рис. 8. Годографы вариаций магнитного поля для интервала 10 с в окрестности 14:20:20 UT в горизонтальной плоскости $B_x B_y$ (сигналы отфильтрованы в полосе 0.5–2 Гц), построенные для станций YAK и MSR

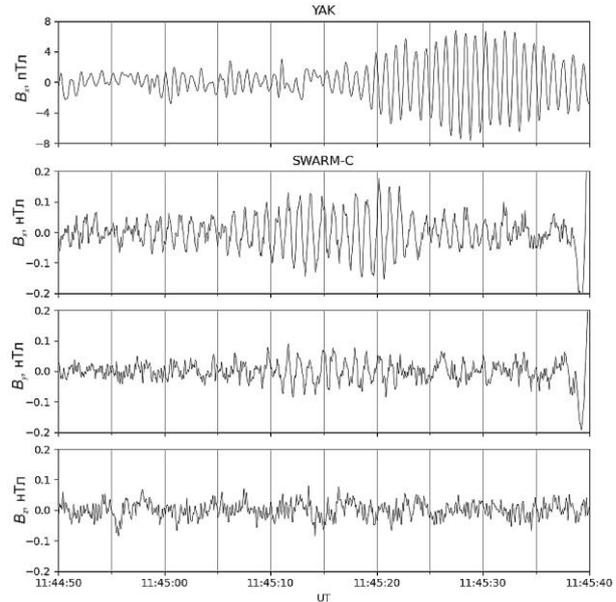


Рис. 9. Магнитограммы (компоненты B_x , B_y , B_z) вариаций на спутнике SWARM-C (отфильтрованные в полосе 0.1–5 Гц) и магнитограмма (B_x -компонента) станции YAK во временном интервале 11:44:50–11:45:40 UT

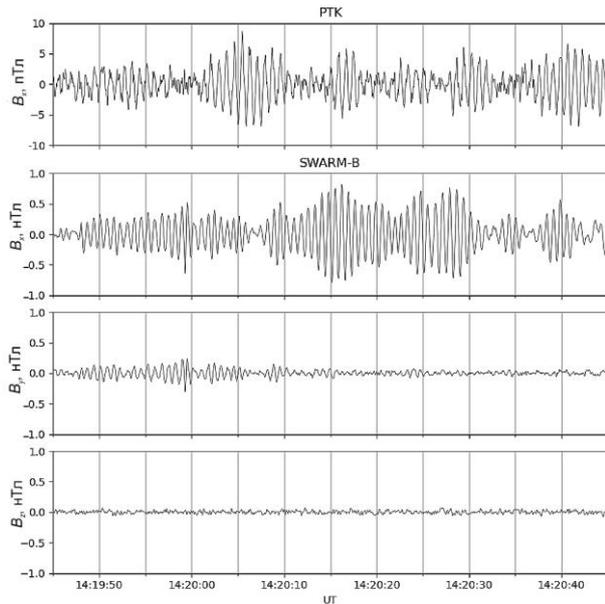


Рис. 10. Магнитограммы колебаний на спутнике SWARM-B (компоненты B_x , B_y , B_z) и магнитограмма пульсаций (B_x -компонента) на станции РТК для временного интервала 14:19:45–14:20:45 UT. Временные ряды отфильтрованы в полосе 0.1–5 Гц

ного волновода. Наиболее интенсивной оказывается поперечная радиальная компонента B_x . Размах колебаний в этой компоненте ~ 0.4 нТл в интервале А и ~ 1.8 нТл в интервале В. На Земле же размах наиболее интенсивной компоненты $B_x \sim 15$ нТл в обоих событиях. Таким образом, амплитуда наземных пульсаций почти на два порядка меньше, чем амплитуда волны в ионосфере.

Отфильтрованные колебания представляют собой серию волновых пакетов, не совпадающих на спутнике и в наземной обсерватории. Например, на рис. 9 видно запаздывание наземного отклика на спутниковый волновой пакет $\Delta t \sim 10$ с. На начало интервала А расстояние между станцией YAK и проекцией орбиты SWARM-C на ионосферу составляет ~ 1350 км. В начале интервала В расстояние между станцией РТК и проекцией орбиты SWARM-B составляет ~ 2790 км. Наблюдаемое запаздывание ~ 10 с при расстояниях до места падения волны ~ 1350 км соответствует распространению вдоль ионосферы с кажущейся скоростью ~ 135 км/с. По порядку величины эта оценка соответствует типичным значениям альфеновской скорости в максимуме F-слоя дневной ионосферы.

Короткий всплеск интенсивности Pc1-колебаний на спутнике можно связать с пересечением локализованной области, занятой волновым пакетом. Для интервала А длительность всплеска на SWARM-C $\tau \sim 25$ с, а для интервала В на SWARM-B $\tau \sim 45$ с. За это время спутники со скоростью $V_s \sim 7.5$ км/с проходят расстояние $V_s \tau \sim 180$ км и ~ 340 км соответственно. Эту грубую оценку можно принять за поперечный размер волнового пакета. В проекции на ионосферу на высоте 100 км это составит ~ 170 и ~ 320 км. Однако по данным одного спутника невозможно определить, является ли модуляция амплитуды

пакета следствием флуктуации генератора сигналов в данной силовой трубке или пересечением нескольких близких силовых трубок разного масштаба с разными амплитудами сигнала. Наличие двух близких спутников позволяет предположить, что, когда оба аппарата находятся в одной трубке, когерентность регистрируемых сигналов высока; если же один из них выходит из трубки, когерентность падает. Для более строгой количественной оценки пространственного масштаба волнового пакета, зарегистрированного спутниками SWARM-A и -C, был построен динамический вейвлет-спектр квадрата когерентности $\gamma^2(f)$ [<https://pycwt.readthedocs.io/en/latest/>] для интервала А (рис. 11). Согласно [Grinstead et al., 2004] вейвлет-спектр когерентности определен как

$$\gamma^2(t) = \frac{|S(t^{-1}W^{xy}(t))|^2}{S(t^{-1}|W^x(t)|^2)S(t^{-1}|W^y(t)|^2)},$$

где W^x , W^y , $W^{xy} = W^x W^{y*}$ — вейвлеты и кросс-вейвлет сигналов X и Y ; S — оператор сглаживания; $*$ — комплексное сопряжение. Высокая когерентность ($\gamma^2 > 0.8$) наблюдается только в интервале 11:45:04–11:45:16 UT, т. е. в течение 12 с. Предполагается, что в этот период оба аппарата находятся внутри пространственно ограниченного волнового пакета. Тогда поперечный размер силовой трубки, занимаемой волновым пакетом, ~ 90 км.

Также был оценен фазовый кросс-спектр между пульсациями на спутниках А и С по методу Блекмана—Тьюки (рис. 12). В частотной области с высокой когерентностью ($\gamma^2 \sim 0.5$) и большой амплитудой автоспектров фазовый сдвиг достигает $\Delta\phi \sim 80^\circ$. Из того, что спутник SWARM-A пролетает восточнее, чем SWARM-C, а сигнал на А явно опережает сигнал на С (см. рис. 12, а), следует, что кажущаяся фазовая скорость сигнала имеет азимутальное западное направление (т. е. направление дрейфа протонов). Величину поперечного волнового вектора можно оценить из соотношения $k_\perp \sim (\pi/180^\circ)\Delta\phi/\Delta x$, что при разnose между спутниками $\Delta x \sim 100$ км дает $k_\perp \sim 4 \cdot 10^{-3}$ км $^{-1}$. Продольное волновое число можно оценить из соотношения $k_\parallel \sim \omega/V_A \sim 6 \cdot 10^{-3}$ км $^{-1}$ (при $V_A = 10^3$ км/с). Таким образом, выделенный фазовый сдвиг указывает на то, что волновой фронт существенно отклоняется от продольного распространения $k_\perp \sim k_\parallel$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Один из принципиальных вопросов физики магнитосферы заключается в том, насколько хорошо наземные наблюдения Pc1 характеризуют активность ЭМИЦ-волн в магнитосфере [Гульельми, Потапов, 2019]. Это важно, так как Pc1-излучения считаются ответственными за питч-угловое рассеяние и высыпание в атмосферу релятивистских электронов радиационного пояса [Miyoshi et al., 2008] и энергичных протонов кольцевого тока [Kennel, Petcheck, 1966; Yahhina et al., 2000], т. е. волновая ЭМИЦ-активность

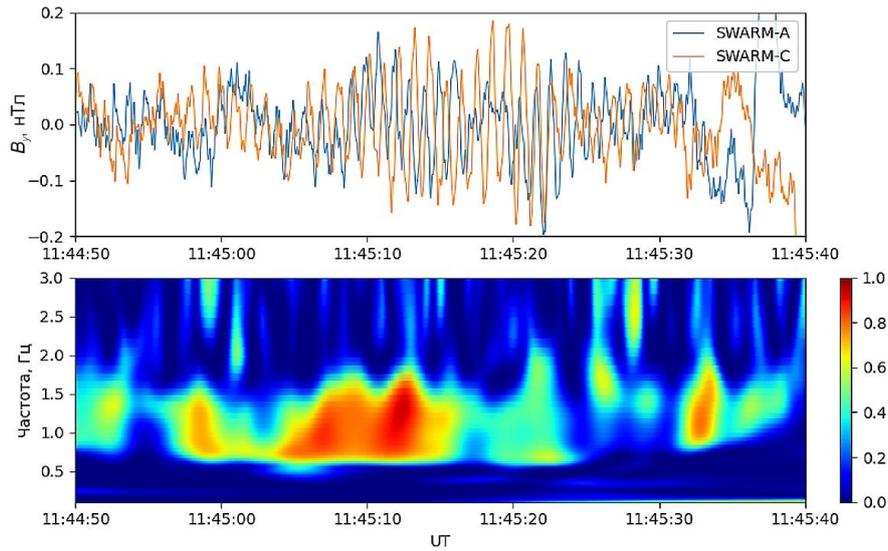


Рис. 11. Динамический вейвлет-спектр когерентности Pc1-колебаний $\gamma(f)$, зарегистрированных спутниками SWARM-A и SWARM-C, для интервала 11:44:50–11:45:40 UT

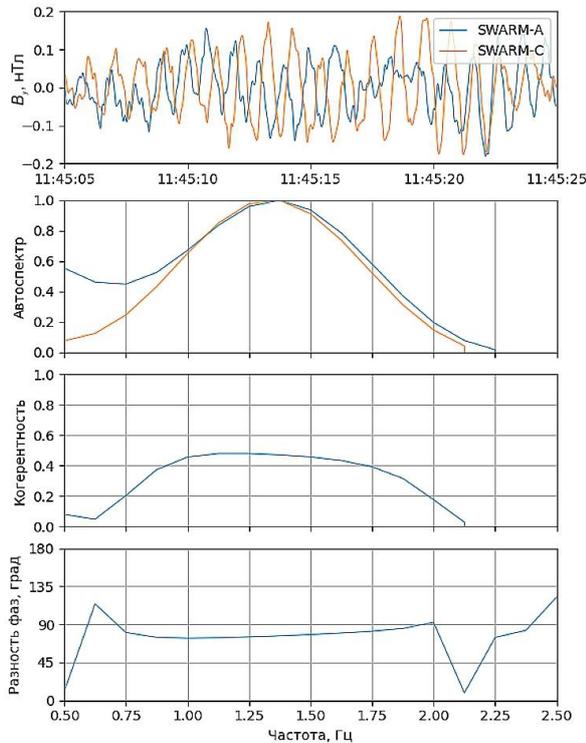


Рис. 12. Фазовый кросс-спектр между пульсациями на спутниках SWARM-A и SWARM-C, рассчитанный по методу Блекмана—Тьюки

является одним из факторов, который контролирует динамику радиационного пояса и кольцевого тока.

Анализ данного события показал, что наземные Pc1-пульсации не являются просто «копией» магнитосферных ЭМИЦ-волн. Существенное отличие сигналов на спутнике и наземных станциях связано с эффективным распространением в ионосферном волноводе. По мере распространения происходит изменение поляризации наземного геомагнитного отклика, связанное с изменением типа сигнала в ионосфере. Вблизи источника (на удалении от места падения порядка поперечного масштаба волнового

пучка) в структуре сигнала преобладает альфвеновская мода, для которой $2D$ -вектор $\text{Div}\mathbf{B}_\perp=0$. Таким образом, сигнал должен быть поляризован перпендикулярно направлению распространения, заданному вектором \mathbf{k}_\perp . На удалении от источника (т. е. на расстоянии более нескольких масштабов волнового пучка) преобладает волноводная БМЗ-мода, для которой $\text{Rot}\mathbf{B}_\perp=0$. В этом случае сигнал должен быть поляризован вдоль \mathbf{k}_\perp , т. е. большая ось должна смотреть на источник. Наблюдаемая на среднеширотных станциях YAK и MSR ориентация эллипса поляризации (см. рис. 8) подтверждает эти представления. На более низкоширотных станциях эллипс поляризации становится неустойчивым.

Благодаря наличию двух близких спутников удалось детально определить амплитудно-фазовую структуру волнового пакета в ионосфере. Волновой пакет ограничен в поперечном направлении силовой трубкой размером ~ 100 км. Фазовый фронт волны, распространяющейся внутри трубки, заметно отклоняется от продольного распространения вдоль геомагнитного поля, $k_\perp \sim k_\parallel$. Теория генерации ЭМИЦ-волн строится в предположении их квази-продольного распространения $k_\perp \gg k_\parallel$, при котором волновой вектор пакета остается параллельным внешнему магнитному полю \mathbf{B}_0 , так как именно такие волны могут эффективно взаимодействовать с резонансными протонами. Однако в неоднородной плазме поперечная неоднородность неизбежно приводит к быстрому росту поперечной составляющей волнового вектора k_\perp , т. е. к измельчению поперечной пространственной структуры пакета [Гульельми, 1970]. Нарастание поперечного волнового вектора при прохождении вдоль силовой линии на расстоянии S происходит по закону $\Delta k_\perp = \partial_x \omega_A(x)(S/V_A)$, где $\omega_A = k_\parallel V_A$. При масштабе продольной неоднородности альфвеновской скорости $a = R_E$ волновой фронт альфвеновского пакета, пройдя расстояние вдоль силовой линии $S > R_E$, становится наклонным —

$|k_{\perp}/k_{\parallel}| > 1$. Дополнительное дробление поперечного масштаба волнового пакета, падающего на ионосферу вдоль геомагнитного поля с наклоном I , т. е. увеличение поперечной компоненты волнового вектора, может происходить при отражении от ионосферы на величину $\Delta k_{\perp} = 2k_{\parallel} \cot I$. Это соотношение вытекает из закона Снеллиуса о сохранении горизонтальной компоненты волнового вектора $\{k_{\perp}\} = 0$. Нарастание k_{\perp} должно выводить волновой пакет из резонанса с энергичными протонами, так как ЭМИЦ-неустойчивость эффективно усиливает только квазипродольно распространяющиеся волны, для которых $k_{\perp} < k_{\perp}^*$. Критический поперечный масштаб определяется величиной $k_{\perp}^* = k_{\parallel} (\omega/\Omega_i)$ [Леонович, 1984]. Поэтому по мере распространения пакет должен становиться квазипоперечным, а его усиление — невозможным. И только при особых условиях в области с резким градиентом плазмы (плазмопауза) неоднородности плазмы и магнитного поля могут частично компенсировать друг друга и режим многократного усиления при прохождении волны через приэкваториальную область магнитосферы становится возможным [Dmitrienko, Mazur, 1992]. Однако в реальной магнитосфере радиальная структура плазмы достаточно изрезана, в результате чего могут образовываться локальные волноводы для ЭМИЦ-волн благодаря совместному действию поперечной дисперсии волны и немонотонности распределения V_A поперек \mathbf{B}_0 . Волноводное распространение возможно только в окрестности вершины силовой линии, где гироотношение ω/Ω_i , обуславливающее поперечную дисперсию, имеет конечное значение. В рассмотренном событии, а также в описанных в литературе событиях, отношение поперечного и продольного масштабов Pc1 волнового пакета $|k_{\perp}/k_{\parallel}| > 1$, т. е. скорее реализуется режим квазипоперечного распространения. Имеющиеся теоретические модели продольного волноводного распространения ЭМИЦ-волн [Леонович и др., 1983] пока не дают объяснения механизму формирования локализованной поперечной структуры Pc1-волн. Вопрос о том, чем определяется поперечный масштаб ЭМИЦ-волн в магнитосфере, остается открытым. Возможно, в окрестности вершины силовой линии реализуется режим квазипродольного распространения, но по мере приближения к ионосфере рефракция делает волновой фронт наклонным. Принятие такого механизма делает сомнительной возможность эффективного отражения волны от ионосферы и ее возврата в область генерации.

Одна из принципиальных проблем при изучении пространственной структуры волновых возмущений в околоземной плазме связана с невозможностью разделить пространственные и временные вариации при односпутниковых наблюдениях. Наблюдения на магнитосферных спутниках дают много информации о временной эволюции Pc1-волн в приэкваториальной области магнитосферы, но по ним невозможно определить поперечную пространственную структуру волн. Наземные наблюдения из-за возможности дальнего (до тысячи километров) распро-

странения сигналов Pc1-диапазона в ионосферном БМЗ-волноводе тоже не могут быть использованы для определения поперечной структуры падающих на ионосферу ЭМИЦ-волн. Основываясь на косвенных данных, Erlandson et al. [1990] связывали небольшую длительность (<5 мин) зарегистрированных на спутнике Viking волновых Pc1-всплесков с малым масштабом волновой структуры, которая в проекции на ионосферу составляла 40–150 км. ЭМИЦ-волны на спутниках Arase и RBSP наблюдались в узкой области L-оболочек с размером на уровне ионосферы ~185 км [Matsuda et al., 2021]. Вызванные рассеянием на ЭМИЦ-волнах высыпания энергичных (>30 кэВ) протонов [Yahnina et al., 2008] и субавроральные полярные сияния [Yahnin et al., 2007; Sakaguchi et al., 2008] также имеют ограниченные размеры по широте $\Delta\Phi \sim 1.0^\circ$. В ходе эксперимента ST5 три низкоорбитальных микроспутника были выведены на одну траекторию, образуя конфигурацию жемчужин на нитке, и пересекали одну и ту же область пространства с задержкой в ~1–10 мин [Engebretson et al., 2008]. Анализ зарегистрированных на ST5 волновых Pc1-пакетов позволил провести разделение пространственной и временной структур ЭМИЦ-волн и показал их узкую локализацию по широте с характерными масштабами от первых десятков до сотни километров [Пилипенко и др., 2012]. Таким образом, оценки масштаба Pc1-волн по данным пары спутников SWARM согласуются с имеющейся отрывочной информацией других наблюдений в верхней ионосфере.

В рассматриваемом событии синхронные спутниковые и наземные наблюдения подтвердили, что в то время как на наземных станциях наблюдается длительное излучение, на ионосферных спутниках регистрируются только короткие всплески Pc1-пульсаций. Естественно предположить, что область генерации в магнитосфере очень локальна и волновой пакет регистрируется только тогда, когда спутник непосредственно пересекает силовую трубку, заполненную ЭМИЦ-излучением, тогда как наземная станция собирает сигналы с большой площади. Однако такое объяснение недостаточно для интерпретации наблюдений на спутниках проекта ST5, где из нескольких десятков зарегистрированных Pc1-пакетов ни в одном случае сигнал не наблюдался последовательно всеми тремя аппаратами [Engebretson et al., 2008]. По-видимому, ЭМИЦ-неустойчивость развивается в приэкваториальной магнитосфере с интенсивным кольцевым током не в режиме непрерывного излучения, а в виде серии относительно коротких (<10 мин) сильно локализованных иррегулярных всплесков неустойчивости, хаотически распределенных в конечной области пространства, где имеются интенсивные потоки энергичных протонов. Область появления Pc1-пульсаций по долготе в среднем охватывает интервал $\sim 82^\circ$ и определяется масштабом потоков неустойчивых энергичных протонов, а не ионосферным распространением [Liu et al., 2023]. Качественно этот режим возбуждения и распространения Pc1-пульсаций показан на рис. 13. Гипотеза требует более строгого теоретического обоснования и экспериментальной проверки.

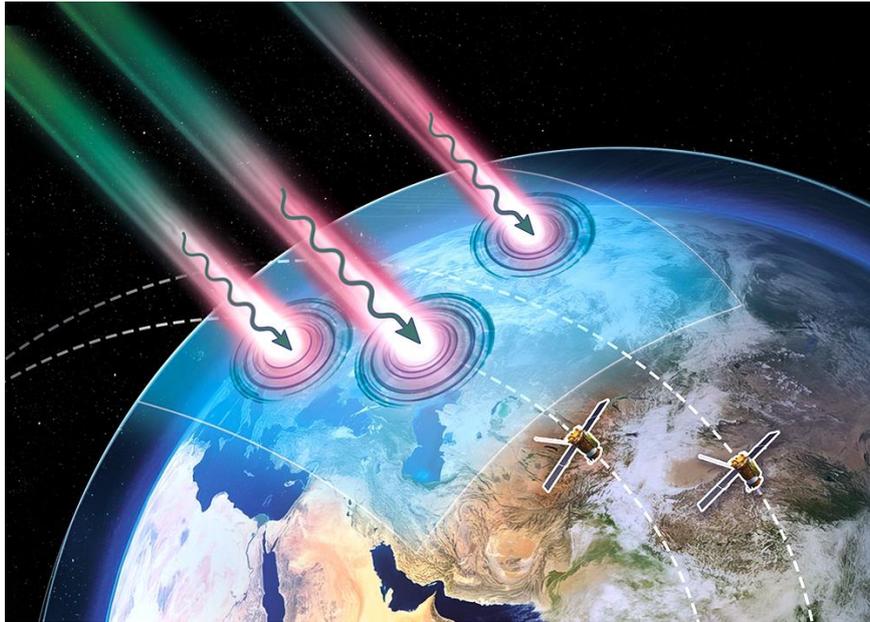


Рис. 13. Качественная иллюстрация предполагаемого режима возбуждения локализованных всплесков Pc1 волновых пакетов и их распространения до наземных станций

Нам представляется, что ЭМИЦ-неустойчивость протонов кольцевого тока преимущественно работает не как конвективный усилитель многократно осциллирующих волновых пакетов, а как генератор волновых всплесков. Действительно, при повышении теплового давления плазмы групповая скорость ЭМИЦ-волн падает, что может привести к переходу неустойчивости из конвективной в абсолютную. По теоретическим оценкам, такой переход происходит при $\beta_{\perp} (T_{\perp} / T_{\parallel})^2 \geq 3.5$, где β_{\perp} — отношение поперечного теплового давления плазмы к магнитному давлению [Wandzura, Coroniti, 1975]. Это условие вполне может выполняться для протонов кольцевого тока вблизи вершины силовой линии даже на фазе восстановления магнитной бури. О наличии конечного β в области генерации ЭМИЦ-волн может свидетельствовать диамагнитное понижение величины магнитосферного магнитного поля [Yin et al., 2024]. Инкремент кинетической ЭМИЦ-неустойчивости мал, и за один проход от области генерации до верхней ионосферы волна не успевает набрать достаточную энергию. Поэтому, по всей вероятности, возбуждение ЭМИЦ-неустойчивости происходит не в мягком режиме, а в режиме жесткого возбуждения [Гульельми, 2015]. Пока же физические причины многих характерных свойств Pc1-пульсаций остаются неясными: при каких условиях развивается конвективная или абсолютная ЭМИЦ-неустойчивость? Чем определяется поперечный размер генерируемых волновых пакетов? Почему не реализуется длительная генерация излучения в одной и той же силовой трубке?

При рассмотрении динамики радиационного пояса Земли полагают, что ЭМИЦ-волны диапазона Pc1 могут приводить к высыпанию релятивистских электронов внешнего радиационного пояса в атмосферу и таким образом снижать уровень потоков «электронов-убийц» до безопасного для спутниковой

электроники [Miyoshi et al., 2008]. Из резонансного условия следует, что бегущий к ионосфере волновой пакет при взаимодействии рассеивает в конус потерь частицы (энергичные протоны или релятивистские электроны), идущие в сопряженную ионосферу. Однако остается неясным, может ли высыпание релятивистских электронов под действием ЭМИЦ-волны с малыми поперечными размерами (<100 км в проекции на ионосферу) повлиять на общий баланс электронов радиационного пояса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренное событие — возбуждение Pc1-пульсаций на восстановительной фазе магнитной бури 25 марта 2023 г. — представляет собой достаточно типичное явление, для которого удалось собрать уникальный набор спутниковых и наземных данных. Попытка объяснить всю совокупность наблюдаемых свойств Pc1-пульсаций привела к необходимости высказать ряд гипотез о механизмах генерации этих волн. Предположительно, ЭМИЦ-неустойчивость развивается в режиме «попкорна на горячей сковородке» как длительная серия локализованных всплесков генерации длительностью менее 10 мин (см. рис. 13). При этом каждый всплеск неустойчивости развивается в другой близкой силовой трубке. Низкоорбитальный спутник может зарегистрировать лишь короткий всплеск ЭМИЦ-излучения при пролете непосредственно через область генерации. Наземная же станция, собирающая ионосферные отклики с большой площади, регистрирует длительную непрерывную серию колебаний. Однако эти предположения пока не подкреплены каким-либо теоретическим моделированием.

Работа поддержана грантом РФФ № 24-77-10012. Выражаем благодарность О.С. Михайловой за полезные советы, руководителю проекта PWING

К. Шиокаве, заведующему обсерваторией «Магадан»
И.Н. Поддельскому — за предоставленные данные,
и рецензентам — за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. *Физика плазмы для физиков*. М.: Атомиздат, 1979, 313 с.
- Гульельми А.В. Циклотронная неустойчивость в магнитосфере с учетом рефракции нарастающих волн. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1970, т. 10, № 4, с. 721–724.
- Гульельми А.В. *МГД-волны в околоземной плазме*. М.: Наука, 1979, 139 с.
- Гульельми А.В. Три нерешенные проблемы физики магнитосферных волн Pc1. *Геофизические исследования*. 2015, т. 16, № 3, с. 63–72.
- Гульельми А.В., Потапов А.С. Проблемы теории магнитосферных волн Pc1. Обзор. *Солнечно-земная физика*. 2019, т. 5, № 3, с. 102–109. DOI: [10.12737/szf-53201910](https://doi.org/10.12737/szf-53201910) / Guglielmi A.V., Potapov A.S. Problems of the Pc1 magnetospheric wave theory. A review. *Solar-Terrestrial Physics*. 2019, vol. 5, iss. 3, pp. 87–92. DOI: [10.12737/stp-53201910](https://doi.org/10.12737/stp-53201910).
- Леонович А.С. Распространение геомагнитных пульсаций в магнитосферных дактах. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1984, т. 24, № 1, с. 94–98.
- Леонович А.С., Мазур В.А., Сенаторов В.Н. Альвеновский волновод. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1983, т. 85, № 1, с. 141–145.
- Михайлова О.С., Климушкин Д.Ю., Магер П.Н. Современное состояние теории УНЧ-пульсаций диапазона Pc1 в плазме магнитосферы с тяжелыми ионами: обзор. *Солнечно-земная физика*. 2022, т. 8, № 1, с. 3–18. DOI: [10.12737/szf-81202201](https://doi.org/10.12737/szf-81202201) / Mikhailova O.S., Klimushkin D.Yu., Mager P.N. The current state of the theory of Pc1 range ULF pulsations in magnetospheric plasma with heavy ions: A review. *Solar-Terrestrial Physics*. 2022, vol. 8, iss. 1, pp. 3–18. DOI: [10.12737/stp-81202201](https://doi.org/10.12737/stp-81202201).
- Пилипенко В.А., Полозова Т.Л., Энгебретсон М. Пространственно-временная структура ионно-циклотронных волн в верхней ионосфере по наблюдениям на спутниках ST5. *Космические исследования*. 2012, т. 50, № 5, с. 355–365.
- Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М.Дж. *Свистовые и альфвеновские циклотронные мазеры в космосе*. М.: Физматлит, 2011, 344 с.
- Anderson B.J., Erlandson R.E., Zanetti L.J. A statistical study of Pc1-2 magnetic pulsations in the equatorial magnetosphere: 1. Equatorial occurrence distributions. *J. Geophys. Res.* 1992, vol. 97, pp. 3075–3088. DOI: [10.1029/91ja02697](https://doi.org/10.1029/91ja02697).
- Demekhov A.G. Recent progress in understanding Pc1 pearl formation. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007, vol. 69, no. 14, pp. 1609–1622. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.01.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.01.014).
- Dmitrienko I.S., Mazur V.A. The spatial structure of quasicircular Alfvén modes of waveguide at the plasmapause — Interpretation of Pc1 pulsations. *Planet. Space Sci.* 1992, vol. 40, iss. 1, pp. 139–148. DOI: [10.1016/0032-0633\(92\)90156-i](https://doi.org/10.1016/0032-0633(92)90156-i).
- Engebretson M.J., Peterson W.K., Posch J.L., et al. Observations of two types of Pc1-2 pulsations in the outer dayside magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, iss. A12, p. 1451. DOI: [10.1029/2001JA000198](https://doi.org/10.1029/2001JA000198).
- Engebretson M.J., Posch J.L., Westerman A.M., et al. Temporal and spatial characteristics of Pc1 waves observed by ST5. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A07206. DOI: [10.1029/2008JA013145](https://doi.org/10.1029/2008JA013145).
- Erlandson R.E., Zanetti L.J., Potemra T.A., et al. Viking magnetic and electric field observations of Pc1 waves at high latitudes. *J. Geophys. Res.* 1990, vol. 95, iss. A5, pp. 5941–5955. DOI: [10.1029/ja095ia05p05941](https://doi.org/10.1029/ja095ia05p05941).
- Fedorov E.N., Pilipenko V.A., Engebretson M.J., Hartinger M.D. Transmission of a magnetospheric Pc1 wave beam through the ionosphere to the ground. *J. Geophys. Res.* 2018, vol. 123, iss. 5, pp. 3965–3982. DOI: [10.1029/2018JA.0253381](https://doi.org/10.1029/2018JA.0253381)–18.
- Fujita S., Tamao T. Duct propagation of hydromagnetic waves in the upper ionosphere. 1. Electromagnetic field disturbances in high latitudes associated with localized incidence of a shear Alfvén wave. *J. Geophys. Res.* 1988, vol. 93, iss. A12, pp. 14665–14673. DOI: [10.1029/ja093ia12p14665](https://doi.org/10.1029/ja093ia12p14665).
- Gary S.P., Thomsen M.F., Yin L., Winske D. Electromagnetic proton cyclotron instability: Interactions with magnetospheric protons. *J. Geophys. Res.* 1995, vol. 100, no. A11, pp. 21961–21972. DOI: [10.1029/95ja01403](https://doi.org/10.1029/95ja01403).
- Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2004, vol. 11, no. 5/6, pp. 561–566. DOI: [10.5194/npg-11-561-2004](https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004).
- Guglielmi A.V., Potapov A.S., Russell C.T. The ion cyclotron resonator in the magnetosphere. *JETP Lett.* 2000, vol. 72, no. 6, pp. 298–300. DOI: [10.1134/1.1328441](https://doi.org/10.1134/1.1328441).
- Hansen H.J., Fraser B.J., Menk F.W., et al. High-latitude Pc1 bursts arising in the dayside boundary layer region. *J. Geophys. Res.* 1992, vol. 97, no. A4, pp. 3993–4008. DOI: [10.1029/91ja01456](https://doi.org/10.1029/91ja01456).
- Horne R.B., Thorne R.M. On the preferred source location for the convective amplification of ion cyclotron waves. *J. Geophys. Res.* 1993, vol. 98, no. A6, pp. 9233–9248. DOI: [10.1029/92ja02972](https://doi.org/10.1029/92ja02972).
- Horne R.B., Thorne R.M. Convective instabilities of electromagnetic ion cyclotron waves in the outer magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, no. A9, pp. 17259–17273. DOI: [10.1029/94ja01259](https://doi.org/10.1029/94ja01259).
- Hu Y.D., Fraser B.J. Electromagnetic ion cyclotron wave amplification and source regions in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, no. A1, pp. 263–272. DOI: [10.1029/93ja01897](https://doi.org/10.1029/93ja01897).
- Johnson J.R., Cheng C.Z. Can ion cyclotron waves propagate to the ground? *Geophys. Res. Lett.* 1999, vol. 26, no. 6, pp. 671–674. DOI: [10.1029/1999gl900074](https://doi.org/10.1029/1999gl900074).
- Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period geomagnetic pulsations. *Space. Sci. Rev.* 1998, vol. 83, no. 3/4, pp. 435–512. DOI: [10.1023/A:1005063911643](https://doi.org/10.1023/A:1005063911643).
- Keika K., Takahashi K., Ukhorskiy A.Y., Miyoshi Y. Global characteristics of electromagnetic ion cyclotron waves: Occurrence rate and its storm dependence. *J. Geophys. Res.* 2013, vol. 118, no. 7, pp. 4135–4150. DOI: [10.1002/jgra.50385](https://doi.org/10.1002/jgra.50385).
- Kennel C.F., Petchek H.E. Limit on stably trapped particle fluxes. *J. Geophys. Res.* 1966, vol. 71, no. 1, pp. 1–28. DOI: [10.1029/jz071i001p00001](https://doi.org/10.1029/jz071i001p00001).
- Kim H., Lessard M.R., Engebretson M.J., Lühr H. Ducting characteristics of Pc 1 waves at high latitudes on the ground and in space. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A09310. DOI: [10.1029/2010JA015323](https://doi.org/10.1029/2010JA015323).
- Liu J., Shiokawa K., Oyama S.-I., et al. A statistical study of longitudinal extent of Pc1 pulsations using seven PWING ground stations at subauroral latitudes. *J. Geophys. Res.* 2023, vol. 128, no. 1, 2021JA029987. DOI: [10.1029/2021ja029987](https://doi.org/10.1029/2021ja029987).
- Matsuda S., Miyoshi Y., Kasahara Y., et al. Multipoint measurement of fine-structured EMIC waves by Arase, Van Allen Probe A, and ground stations. *Geophys. Res. Lett.* 2021, vol. 48, e2021GL096488. DOI: [10.1029/2021GL096488](https://doi.org/10.1029/2021GL096488).
- Mikhailova O.S., Klimushkin D.Yu., Mager P.N. Pc1-pulsations: the parallel structure in the magnetosphere plasma with admixture of the heavy ions. *Adv. Astron. Space Phys.* 2012, vol. 2, pp. 88–90.

- Mikhailova O.S. The spatial structure of ULF waves in the equatorial resonator localized at the plasmopause with the admixture of the heavy ions. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 108, pp. 10–16. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.12.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.12.007).
- Miyoshi Y., Sakaguchi K., Shiokawa K., et al. Precipitation of radiation belt electrons by EMIC waves, observed from ground and space. *Geophys. Res. Lett.* 2008, vol. 35, L23101. DOI: [10.1029/2008GL035727](https://doi.org/10.1029/2008GL035727).
- Mursula K. Satellite observations of Pc1 pearl waves: The changing paradigm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007, vol. 69, pp. 1623–1634. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.02.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.02.013).
- Rauch J.L., Roux A. Ray tracing of ULF waves in a multi-component magnetospheric plasma: consequences for the generation mechanism of ion cyclotron waves. *J. Geophys. Res.* 1982, vol. 87, no. A10, pp. 8191–8198. DOI: [10.1029/JA087iA10p08191](https://doi.org/10.1029/JA087iA10p08191).
- Sakaguchi K., Shiokawa K., Miyoshi Y., et al. Simultaneous appearance of isolated auroral arcs and Pc1 geomagnetic pulsations at subauroral latitudes. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A05201. DOI: [10.1029/2007JA012888](https://doi.org/10.1029/2007JA012888).
- Shiokawa K., Katoh Y., Hamaguchi Y., et al. Ground-based instruments of the PWING project to investigate dynamics of the inner magnetosphere at subauroral latitudes as a part of the ERG-ground coordinated observation network. *Earth, Planets and Space.* 2017, vol. 69, no. 1, article number 160. DOI: [10.1186/s40623-017-0745-9](https://doi.org/10.1186/s40623-017-0745-9).
- Trakhtengerts V.Y., Demekhov A.C. Generation of Pc1 pulsations in the regime of backward wave oscillator. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007, vol. 69, pp. 1651–1656. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.02.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.02.009).
- Usanova M.E., Mann I.R., Rae I.J., et al. Multipoint observations of magnetospheric compression-related EMIC Pc1 waves by THEMIS and CARISMA. *Geophys. Res. Lett.* 2008, vol. 35, L17S25. DOI: [10.1029/2008GL034458](https://doi.org/10.1029/2008GL034458).
- Wandzura S., Coroniti F.V. Nonconvective ion cyclotron instability. *Planet. Space Sci.* 1975, vol. 23, pp. 123–131. DOI: [10.1016/0032-0633\(75\)90073-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(75)90073-2).
- Yahnina T.A., Yahnin A.G., Kangas J., Manninen J. Proton precipitation related to Pc1 pulsations. *Geophys. Res. Lett.* 2000, vol. 27, no. 21, pp. 3575–3578. DOI: [10.1029/2000gl003763](https://doi.org/10.1029/2000gl003763).
- Yahnin A.G., Yahnina T.A., Frey H.U. Subauroral proton spots visualize the Pc1 source. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A10223. DOI: [10.1029/2007JA012501](https://doi.org/10.1029/2007JA012501).
- Yahnina T.A., Frey H.U., Bösinger T., Yahnin A.G. Evidence for subauroral proton flashes on the dayside as the result of the ion cyclotron interaction. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A07209. DOI: [10.1029/2008JA013099](https://doi.org/10.1029/2008JA013099).
- Yin Z.-F., Zhou X.-Z., Hu Z.-J., et al. Westward excursion of Pc1/EMIC waves and their source protons: Paradoxical observations from ground and space. *J. Geophys. Res.* 2024, vol. 129, e2023JA032317. DOI: [10.1029/e2023JA032317](https://doi.org/10.1029/e2023JA032317).
URL: https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/magne/magne_stations.html (дата обращения 20 марта 2025 г.).
URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm (дата обращения 20 марта 2025 г.).
URL: <https://sscweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 20 марта 2025 г.).
URL: <https://pycwt.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения 20 марта 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Позднякова Д.Д., Пилюпенко В.А., Носэ М., Хомутов С.Ю., Баишев Д.Г. Спутниковые и наземные наблюдения Pc1-пульсаций во время магнитной бури в марте 2023 г. *Солнечно-земная физика.* 2025, т. 11, № 2, с. 56–68. DOI: [10.12737/szf-112202505](https://doi.org/10.12737/szf-112202505).