

---

---

**КОЛЕБАНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В ДИАПАЗОНЕ 2.5–12 Гц В F-СЛОЕ ИОНОСФЕРЫ  
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ SWARM**

**GEOMAGNETIC VARIATIONS  
IN THE FREQUENCY RANGE 2.5–12 Hz IN THE IONOSPHERIC F LAYER  
AS MEASURED BY SWARM SATELLITES**

---

---

**Н.В. Ягова** *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия, nyagova@ifz.ru***Е.Н. Федоров** *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия, enfedorov1@yandex.ru***В.А. Пилипенко** *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия, pilipenko\_va@mail.ru  
Геофизический центр РАН,  
Москва, Россия***Н.Г. Мазур** *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия, ngmazur@mail.ru***В.А. Мартинес-Беденко** *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия, lera\_m0@mail.ru***N.V. Yagova***Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,  
Moscow, Russia, nyagova@ifz.ru***E.N. Fedorov***Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,  
Moscow, Russia, enfedorov1@yandex.ru***V.A. Pilipenko***Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,  
Moscow, Russia, pilipenko\_va@mail.ru  
Geophysical Center RAS,  
Moscow, Russia***N.G. Mazur***Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,  
Moscow, Russia, ngmazur@mail.ru***V.A. Martines-Bedenko***Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,  
Moscow, Russia, lera\_m0@mail.ru*

**Аннотация.** Исследованы вариации геомагнитного поля диапазона 2.5–12 Гц в F-слое ионосферы выше максимума электронной концентрации по данным измерений на двух спутниках миссии SWARM. Для анализа использовались данные, полученные в условиях слабой и умеренной геомагнитной возмущенности в течение двенадцати дней в сентябре и декабре 2016 г. Для разделения пространственных неоднородностей и временных вариаций магнитного поля изучались временные формы сигналов и кросс-спектры, в скользящем окне длительностью 2.56 с. На широтах вблизи и выше полярной границы аврорального овала, соответствующих входным слоям магнитосферы и области дневного полярного каспа/клефта, обнаружены максимумы вероятности появления колебаний и их спектральной плотности мощности. Типичные высокоширотные колебания представляют собой волновые пакеты длительностью 5–10 периодов, наблюдаемые с малой задержкой на спутниках, разнесенных на расстояние 40–100 км. Предположительно, эти колебания являются ионосферным проявлением электромагнитных ионно-циклотронных волн, которые генерируются во внеэкваториальных областях внешней магнитосферы вблизи полярного каспа. Детально рассматриваются волновые формы и кросс-спектры колебаний для двух событий с отличающимися пространственными распределениями магнитного поля в ионосфере. Для условий в ионосфере, соответствующих событию 1 (17 сентября, геомагнитная широта 80°, полуполуденный сектор), в рамках модели о падении на ионосферу пучка альфвеновских волн конечного

**Abstract.** We have analyzed geomagnetic variations in the 2.5–12 Hz frequency range in the ionospheric F layer above the electron density maximum, using data from two SWARM satellites. The analysis is based on the data obtained under weak and moderate magnetic activity for 12 days in September and December 2016. To separate spatial inhomogeneities from time variations of the magnetic field, we analyzed signal waveforms and cross-spectra in a 2.56 s sliding window. A maximum in the occurrence and power spectral density of the variations was found at latitudes above the polar boundary of the auroral oval, which correspond to the magnetospheric input layers and dayside polar cusp/cleft. Typical waveforms of the high-latitude variations are the wave packets lasting for 5–10 periods, recorded with a short time delay by two satellites spaced by 40–100 km. These variations might be the ionospheric manifestation of the electromagnetic ion-cyclotron waves generated at the non-equatorial magnetosphere near the polar cusp. The waveforms and cross-spectra of the variations are examined in more details for two cases with different spatial distributions of the magnetic field in the ionosphere. For the ionospheric conditions corresponding to event 1 (September 17, 80° geomagnetic latitude, afternoon sector), spatial distributions of wave magnetic field in the ionosphere and on Earth are estimated using a model of Alfvén beam with a finite radius incident on the ionosphere [Fedorov et al., 2018].

**Keywords:** ionosphere, polar cusp, geomagnetic pulsations.

радиуса [Fedorov et al., 2018] оценены пространственные распределения магнитного поля волны в ионосфере и на поверхности Земли.

**Ключевые слова:** ионосфера, полярный касп, геомагнитные пульсации.

## ВВЕДЕНИЕ

Данные измерений магнитного поля с частотой оцифровки 10–100 Гц на низкоорбитальных спутниках стали доступны для широкого круга исследователей сравнительно недавно. Область естественных электромагнитных колебаний герцового диапазона лежит между геомагнитными пульсациями и крайне низкочастотным (КНЧ) излучением, а свойства этих колебаний в ионосфере остаются слабо исследованными. Диапазон частот от единиц до десятков герц соответствует высшим гармониками ионосферного альфвеновского резонанса (ИАР) [Поляков, Рапопорт, 1981; Belyaev et al., 1999], а в магнитосфере, в зависимости от высоты, — частотам ионно-циклотронных и ион-ионных гибридных (ИИГ) резонансов [Buchsbau, 1960]. Анализ механизмов возникновения и распространения ионно-циклотронных и ИИГ-волн в магнитосфере Земли можно найти в обзоре [Михайлова и др., 2022].

Другим источником ионосферных колебаний в этом диапазоне частот является проникновение в ионосферу гармоник шумановского резонанса (ШР). Опубликованы единичные наблюдения проникновения гармоник ШР на ионосферные высоты [Simões et al., 2011]. В работе [Simões et al., 2011] указывается на постоянное существование в ионосфере колебаний электрического поля на частотах около 8 Гц, но выраженного спектрального максимума на этих частотах в магнитном поле не наблюдалось.

В результате доплеровского эффекта колебания, регистрируемые на низкоорбитальных спутниках, могут быть проявлением более низкочастотных мелкомасштабных колебаний [Le et al., 2011] или результатом прохождения спутником квазистатической области высокой неоднородности магнитного поля, например, при пересечении аврорального овала. Для корректного разделения пространственных неоднородностей и временных вариаций необходимы многоспутниковые измерения. Такая возможность появилась после запуска спутниковых миссий ST5 [Slavin et al., 2008] и SWARM [Olsen et al., 2013]. Три спутника ST-5 были выведены на квазимеридиональные орбиты. Расстояние между спутниками менялось от 5000 до 50 км, что позволило разделять временные и пространственные неоднородности на масштабах от ~10 с до 10 мин.

Миссия SWARM состоит из трех идентичных спутников: два на расстоянии друг от друга не более 200 км, а третий — на расстоянии от нескольких сотен до нескольких тысяч километров от первых двух. Такая конфигурация создает космическую градиентную установку и позволяет исследовать возмущения на разных пространственных масштабах. Ионосферные спутники оказываются эффективным инструментом для анализа крупномасштаб-

ных токовых структур, что подтверждается одновременным анализом ионосферных и наземных данных [Juusola et al., 2016]. Lühr et al. [2015] исследовали пространственные структуры продольных токов в авроральной зоне, используя данные измерений магнитного поля на спутниках SWARM, и показали, что время, в течение которого можно пренебречь изменениями токовых структур с пространственным масштабом 10 км, не превышает 10 с. Эти исследования базировались на данных с частотой оцифровки 1 Гц. Исследованию геомагнитных пульсаций диапазона Pc1 (0.2–5 Гц) в ионосфере по данным спутников ST-5 посвящена работа [Engebretson et al., 2008]. Пульсации высокой амплитуды (размах колебаний >10 нТл) классифицировались по количеству спутников, на которых они были зарегистрированы. В течение трех месяцев наблюдений были зафиксированы 48 таких событий. Engebretson et al. [2008] проанализировали их распределения по частотам спектральных максимумов,  $L$ -оболочкам и местному времени. Больше трети событий было обнаружено во внешней магнитосфере ( $L > 9$ ), и частоты всех зафиксированных в этой области пульсаций были ниже 1.5 мГц. Анализ поляризации и пространственного масштаба пульсаций в ионосфере и на Земле выполнен в работе [Пилипенко и др., 2012]. Колебания в ионосфере на высотах 1000–4000 км исследовались по данным измерений магнитного поля на спутниках ST-5. Для среднеширотных всплесков Pc1, зарегистрированных одновременно хотя бы двумя спутниками, было обнаружено, что временная задержка между волновыми пакетами на спутниках примерно соответствует времени, определенному по расстоянию между спутниками. Это позволило оценить пространственный масштаб возмущений как несколько десятков километров.

Во внешних областях магнитосферы, особенно в зонах максимальных градиентов магнитного поля, например в полярном каспе, наблюдаются резко анизотропные распределения заряженных частиц (например, кислорода ионосферного происхождения), которые эффективно взаимодействуют с ионно-циклотронными волнами [Le Queau, Roux, 1992]. Для интересующих нас колебаний существенной является такая область внешней магнитосферы, как мантия, которая характеризуется преимущественным направлением потока ионов от ионосферы. Сравнительный анализ колебаний потоков ионов в области мантии, а также магнитного поля в магнитосфере на спутнике POLAR и в областях каспа/клефта на поверхности Земли [Engebretson et al., 2005] показал, что именно область мантии является источником волн диапазона Pc1–2 (<1 Гц), распространяющихся по направлению к Земле. При этом не было выявлено соответствия между частотами колебаний и отдельных волновых пакетов в магнитосфере и на земле. Это связано с тем, что волны диапазона Pc1 распро-

страняются не строго вдоль магнитного поля. Для них существуют области волноводного распространения вблизи минимумов альфвеновской скорости в магнитосфере [Леонович и др., 1983] и в ионосфере (см. [Kim et al., 2011] и цитированную там литературу). В работе [Kim et al., 2021] изучено ионосферное распространение пульсаций диапазона Pc1 ( $f < 5$  Гц) по данным измерений на спутниках SWARM. Авторы показали, что максимальная вероятность появления пульсаций наблюдается на авроральных широтах, резко падая к широтам полярной шапки.

В качестве источников наземных высокоширотных волн диапазона Pc1 рассматриваются скачки динамического давления солнечного ветра [Arnoldy et al., 2005] и магнитные импульсные события, наблюдаемые как всплески длительностью порядка нескольких минут на широтах полярного каспа/клефта [Lanzerotti et al., 1991; Kataoka et al., 2003]. При резких изменениях динамического давления возрастает анизотропия температуры протонов и возникают всплески пульсаций Pc1 в диапазоне широт от полярной шапки до аврорального овала [Arnoldy et al., 2005; Пархомов и др., 2010]. Самые крупномасштабные всплески Pc1 регистрируются от полярных до средних широт и связаны с приходом переднего края межпланетной ударной волны еще до развития основного бурового возмущения [Пархомов и др., 2014]. С магнитными импульсами связывают всплески пульсаций Pc1 на широтах дневного полярного каспа [Sato et al., 1999]. В работе [Francia et al., 2020] анализируются пульсации диапазона Pc1 на частотах ниже 1 Гц, наблюдаемые в двух полушариях от полярных до авроральных широт. В полярных широтах, в отличие от авроральных, благоприятные условия генерации пульсаций соответствуют слабой и умеренной возмущенности. Для этих условий одновременно наблюдаются пульсации с близкими частотами в широком диапазоне широт и ионосферные неоднородности. На широтах полярной шапки пульсации Pc1 наблюдаются в виде так называемой серпентинной эмиссии, т. е. квазирегулярных пульсаций с частотами до 5 Гц, частота и амплитуда которых модулируются с периодом от единиц до десятков минут (см. [Гульельми и др., 2015] и цитируемую литературу). Вероятно, они связаны с электромагнитными ионно-циклотронными (ЭМИЦ) волнами в межпланетной среде.

Колебания магнитного поля на частотах выше номинального диапазона Pc1 исследованы хуже, чем пульсации Pc1, и можно указать только небольшое количество публикаций, посвященных наблюдениям этих колебаний на Земле и в космосе. Так, пульсации с частотами до 15 Гц были зарегистрированы на среднеширотной станции «Новая жизнь» (параметр Мак-Илвайна  $L=2.6$ ) во время магнитной бури 2004 г. [Ермакова и др., 2015]. Выполненные Ермаковой и др. [2015] расчеты позволяют сделать вывод о том, что источником этих колебаний являются ионно-циклотронные волны, возбуждаемые на необычно низких  $L$ -оболочках из-за экваториального смещения аврорального овала во время бури.

Источниками возмущений в широком диапазоне частот являются полярный касп и пограничные слои магнитосферы. Запуск спутниковой миссии Cluster,

состоящей из четырех аппаратов, находящихся друг от друга на расстоянии от нескольких сотен до нескольких тысяч километров, позволил изучить спектральные распределения вариаций магнитного поля в каспе и входных слоях магнитосферы. Nykyri et al. [2006] исследовали вариации магнитного поля и распределения ионов с энергиями 10–40 кэВ при пересечении каспа спутниками Cluster на удалении от центра Земли около  $8R_E$ . Колебания имели степенной спектр с постоянным наклоном в интервале от 1 до 8 Гц, в котором видны до пяти максимумов, соответствующие, по мнению Nykyri et al. [2006], гармоникам протонно-циклотронного резонанса. Jacobsen, Moen [2010] исследуют колебания электрического поля в диапазоне от 1 до 100 Гц на промежуточных высотах в каспе и их связь с ионными потоками по измерениям на спутнике Cluster-4. В пользу локальной генерации волн на промежуточных высотах в каспе свидетельствуют значимые положительные корреляции между потоками ионов и амплитудой колебаний на временах усреднения 30 и 60 с и излом спектра на локальной протонной гирочастоте, составлявшей для исследованных событий  $\sim 8$  Гц. Одновременное исследование электронных и ионных потоков на средних удалениях от экватора в каспе, клефте и мантии, выполненное в работе [Bogdanova et al., 2004] по измерениям на спутнике Cluster, показало, что рост поперечной температурной анизотропии ионов и широкополосные электромагнитные эмиссии в диапазоне 1–10 Гц связаны с всплесками потоков сверхтепловых электронов в области клефта.

В настоящей работе исследуются вариации геомагнитного поля в диапазоне частот от 2.5 до 12 Гц, который частично совпадает с номинальным диапазоном пульсаций Pc1, однако включает и более высокие частоты. Анализ выполняется по данным измерений магнитного поля на спутниках SWARM-A и -C. Орбиты спутников являются квазимеридиональными, расстояние между спутниками меняется от 40 км вблизи полюса до 160 км у экватора. Это в принципе позволяет разделить возмущения различных пространственных масштабов. В предельных случаях регистрируемые на спутниках частоты колебаний могут совпадать с частотой, регистрируемой неподвижным сенсором, или сколь угодно сильно отличаться от нее. Первый случай соответствует волновым возмущениям, пространственный масштаб которых много больше, чем расстояние между спутниками, а второй — прохождению спутником квазистатических пространственных неоднородностей поля. В одноточечных наблюдениях разделить эти случаи по измерениям только магнитного поля невозможно. Если же доступны измерения двух или более спутников, в первом случае максимальная когерентность будет наблюдаться при сдвиге по времени  $\tau$ , малом по сравнению с периодом колебаний, а во втором — при значении  $\tau$ , определенном по пространственному масштабу структуры и скорости спутника. Мы рассматриваем возмущения первого типа. Данные измерений и метод обработки описаны в разделе 1, результаты анализа данных приведены в разделе 2, а в разделах 3 и 4 обсуждаются пространственная структура поля альфвеновского пучка конечного радиуса и источники наблюдаемых колебаний.



## 1. ДАННЫЕ И ОБРАБОТКА

Для анализа были выбраны двенадцать дней в сентябре и декабре 2016 г. Условием отбора было отсутствие магнитных бурь с  $Dst < -40$  нТл в течение всего дня и четырех предыдущих суток. При этом авроральная активность менялась от слабой до умеренно высокой, а минимальные значения вертикальной компоненты  $B_z$  межпланетного магнитного поля (ММП) для десяти из двенадцати дней не опускались ниже  $-5$  нТл. Данные по минимальным и медианным за 24 ч значениям  $B_z$  и индексам геомагнитной активности приведены в таблице.

Высота орбит спутников составляла около 450 км, т. е. они лежали выше максимума электронной концентрации. Данные измерений трех компонент магнитного поля доступны с временным разрешением 0.02 с. Для анализа использовались данные после высокочастотной фильтрации с частотой отсечки 1 Гц, что устраняет влияние пространственных вариаций постоянного поля с масштабом порядка или больше 10 км. Исследовались временные формы колебаний горизонтальных компонент геомагнитного поля и их спектральные параметры.

Данные измерений магнитного поля на спутниках SWARM доступны в системе спутника NEC (North-East-Center), ориентированной по географическим координатам: компонента X ориентирована вдоль меридиана, Z направлена к центру Земли, а Y — на восток. Для высокоширотных областей, которым посвящена настоящая работа, угол между главным магнитным полем Земли и вертикалью мал, т. е. горизонтальные компоненты поля примерно соответствуют поперечным. При этом азимутальный угол между географическим и геомагнитным меридианами на высоких широтах может иметь значение от 0 до  $90^\circ$ . Поэтому для каждого момента времени с помощью адаптированного кода GEOPACK [Rapitashvili et al., 1997] был выполнен пересчет горизонтальных компонент поля в систему, ориентированную по исправленным геомагнитным координатам (CGM), в которой  $B_N$  — меридиональная компонента поля, направленная на север,  $B_E$  — широтная, направленная на восток. Поскольку используемая модель не позволяет производить расчеты для приэкваториальной области, анализировались только вариации поля для геомагнитных широт выше  $27^\circ$  в обоих полушариях.

Кросс-спектры рассчитывались методом Блэкмана—Тьюки в окне 128 точек (2.56 с) со сглаживанием 16-точечным окном Кайзера [Дженкинс, Ваттс, 1972]. Выбранное временное окно соответствует прохождению спутником расстояния около 20 км. Для около 70 % интервалов геомагнитные широты спутников в один и тот же момент времени различаются больше чем на  $0.2^\circ$  (22 км). Для анализа выбраны именно эти интервалы, поскольку для них разница во времени прохождения спутниками одной геомагнитной широты больше длины интервала, на котором вычисляется спектр, и в несколько раз превышает период исследуемых колебаний.

Из всех интервалов, для которых выполнялся спектральный анализ, для дальнейшего исследова-

ния были выбраны две группы, определенные по значениям спектральной плотности мощности (Power Spectral Density, PSD) на частотах локальных спектральных максимумов и спектральной когерентности вариаций широтной компоненты на двух спутниках. Анализировались отношения суммарной длительности интервалов, для которых PSD превышает заданный порог, к полной длительности всех интервалов и среднее значение PSD на частотах спектральных максимумов. Пороговое значение спектральной плотности мощности  $PSD_b$  принято равным  $3 \cdot 10^{-5}$  нТл<sup>2</sup>/Гц, что соответствует размаху колебаний около 0.1 нТл.

Эти же параметры изучались для колебаний с когерентностью сигналов на двух спутниках выше порогового значения коэффициента когерентности  $\gamma_b^2 = 0.5$ . Из рассмотрения исключались когерентные интервалы, для которых разность геомагнитных широт спутников мала ( $|\Delta\Phi| < 0.2^\circ$ ), поскольку в этом случае сходство зарегистрированных сигналов может вызываться одновременным прохождением спутниками вытянутой вдоль широты структуры. При таком выборе параметров высокая спектральная когерентность и согласованное изменение амплитуды и частоты сигнала во временной области означают, что доплеровское смещение частоты мало и частота сигнала в ионосфере близка к частоте, определенной по спутниковым измерениям.

Суммарная длительность интервалов, для которых  $PSD > PSD_b$ , составляет около 50 ч. Дальше эти интервалы называются надпороговыми. Длительность интервалов, на которых выполняются условия  $\gamma^2 \geq 0.5$  и  $|\Delta\Phi| > 0.2^\circ$ , составляет около 1.3 ч. Далее они называются когерентными и считается, что зарегистрированные в это время вариации магнитного поля можно рассматривать как когерентные колебания, наблюдающиеся одновременно на двух спутниках.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. Пространственные распределения спектральных параметров

Чтобы локализовать источники ионосферных колебаний, рассмотрим, на каких геомагнитных широтах преимущественно наблюдаются надпороговые вариации магнитного поля и когерентные колебания в этой полосе частот, а также как вероятность их появления распределена по частоте.

На рис. 1 представлено пространственное распределение PSD на частотах спектральных максимумов широтной компоненты  $B_E$  для всех надпороговых на спутнике SWARM-A и когерентных на SWARM-A и SWARM-C колебаний. По оси абсцисс отложена исправленная геомагнитная широта  $\Phi$ , по оси ординат — частота спектрального максимума  $f$ . Для обоих типов сигнала максимальное значение PSD наблюдается на широтах выше  $70^\circ$  в обоих полушариях. Для интервалов с произвольным значением когерентности (верхние панели) высокоширотный максимум наблюдается на всех частотах, захватывая

Анализируемые дни и характеризующие их параметры магнитной активности

N	мес./день	ММП $B_z$ , нТл		$Dst$ , нТл	$AE$ , нТл	
		min 24 ч	median	min, 96 ч	max, 24 ч	median
254	09/10	-3.4	-0.3	-38	421	60
257	09/13	-6.1	-2.7	-19	606	130
260	09/16	-4.2	2.1	-34	259	33
261	09/17	-4.3	2.5	-34	117	34
266	09/22	-3.5	1.7	-35	295	37
336	12/01	-3.9	2.8	-23	263	25
337	12/02	-3.4	-1.2	-18	339	48
338	12/03	-2.8	-0.6	-18	270	34
349	12/14	-3.4	0.3	-27	393	43
350	12/15	-2.8	0.6	-19	240	29
351	12/16	2.6	0.7	-16	212	23
352	12/17	-10.6	0.0	-12	718	67

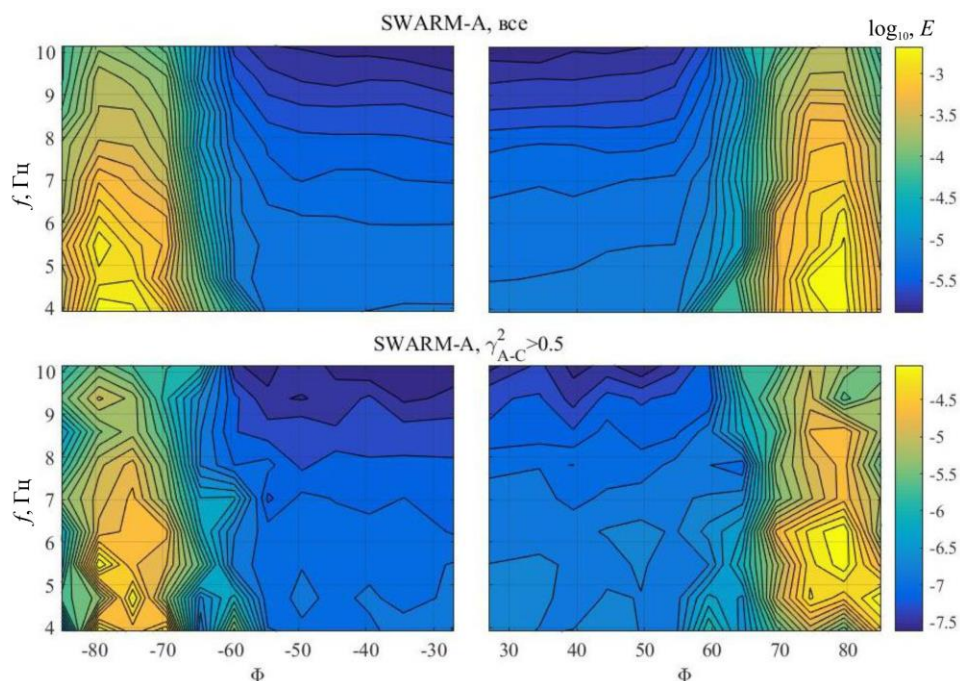


Рис. 1. Распределение PSD на частотах спектральных максимумов вариаций широтной компоненты  $B_E$  магнитного поля по геомагнитной широте и частоте для всех надпороговых (верхние панели) на спутнике А и когерентных на спутниках А и С (нижние панели) колебаний для Южного (слева) и Северного (справа) полушария

более низкие широты (вплоть до  $60^\circ$ ) на низкочастотном краю спектра.

Для когерентных интервалов в распределении можно выделить отдельные максимумы. Так, в Южном (летнем) полушарии наблюдаются максимумы на частотах около 5.5 и 9.5 Гц на широте около  $-80^\circ$  и на 4.5–5 Гц на  $-75^\circ$ . В Северном (зимнем) полушарии более широкие максимумы наблюдаются на 5–6 и 8–9 Гц на широтах  $75-80^\circ$ . Кроме того, в обоих полушариях на низкочастотном краю спектра наблюдается максимум на широте около  $60^\circ$  и небольшие повышения PSD на частотах ниже 7 Гц на более низких широтах. Наличие интервалов с высокой когерентностью сигнала позволяет предположить, что наблюдаемые флуктуации магнитного поля являются пульсациями, а их частоты близки к зарегистрированным на спутнике. Далее будем рассматривать только области наиболее интенсивных вариаций, соответствующие геомагнитным широтам от  $68^\circ$  до  $80^\circ$  в обоих полушариях.

Уточним, каким образом частота появления и спектральная мощность распределены по геомагнитным широтам  $\Phi$  и местному магнитному времени (MLT). На рис. 2 представлены распределения по MLT доли  $R$  интервалов когерентных колебаний и их PSD на частотах спектральных максимумов для четырех широтных зон в двух полушариях. Большую часть суток значения  $R$  для всех широтных зон колеблются между 0.02 и 0.04, а заметные максимумы частоты появления когерентных колебаний наблюдаются в Южном полушарии на самых высоких широтах в утренние (MLT=6) и послеполуденные (MLT=15) часы, причем послеполуденный максимум фиксируется во всех широтных зонах. В Северном полушарии главный максимум лежит в предутреннем секторе (MLT=3) на широтах  $74-77^\circ$ .

В дневные часы PSD существенно выше на более высоких широтах ( $|\Phi| > 74^\circ$ ). Наиболее ярко этот эффект проявляется в предполуденные часы в обоих полушариях, когда разница между максимальным и ми-

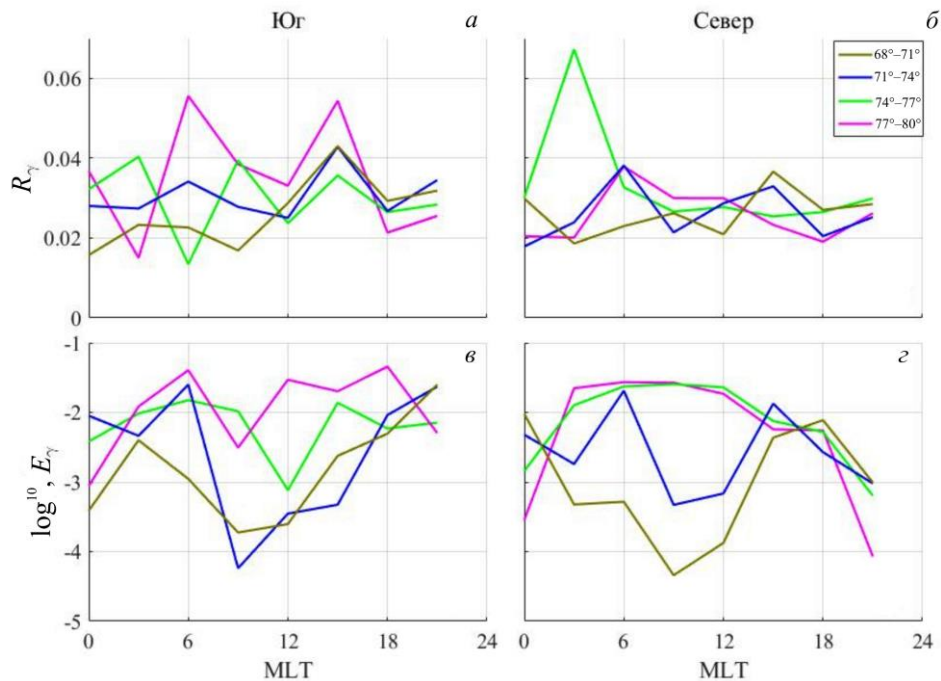


Рис. 2. Частота появления (верхние панели) и спектральная мощность (нижние панели) когерентных колебаний в четырех широтных зонах для Южного (слева) и Северного (справа) полушария

нимальными значениями  $PSD$  достигает двух порядков. Основное различие суточного хода  $PSD$  для широтных зон  $|\Phi| > 74^\circ$  в Южном и Северном полушариях связано с более высокими значениями в околополуденные часы для зоны  $74^\circ-77^\circ$  в Северном полушарии, где его значения практически не отличаются от значений в интервале широт  $77^\circ-80^\circ$ . В Южном полушарии на широтах  $74^\circ < |\Phi| < 77^\circ$  вблизи полудня имеется слабый минимум, а два максимума соответствуют утренним и послеполуденным часам. В предполуденном и полуденном секторах  $PSD$  в высокоширотных зонах падает и максимум  $PSD$  смещается в зону авроральных широт.

Таким образом, основной вклад в наблюдаемые на рис. 1 высокоширотные максимумы вносят колебания, возникающие в дневные часы на геомагнитных широтах от  $74$  до  $80^\circ$ . Магнитосферными проекциями этих областей являются зоны дневного полярного каспа и входные слои, такие как мантия и низкоширотный пограничный слой. Значения  $PSD$  в самой низкоширотной зоне из рассматриваемых, соответствующей номинальной авроральной зоне, значительно ниже. Спад наблюдается также на высоких широтах в ночные часы, т. е. в области полярных шапок. Максимумы, наблюдающиеся на низкоширотном краю изучаемой области ( $|\Phi| \sim 60^\circ$ ), соответствуют частотам  $Pc1$ , а их положение — зоне плазмопаузы.

Оценки положения аврорального овала, проведенные по эмпирической модели [Фельдштейн, 1963] с использованием аппроксимации [Holzworth, Meng, 1975] границ аврорального овала, для интервалов как надпороговых возмущений, так и когерентных пульсаций показали, что действительно в 75 % случаев когерентные на двух спутниках колебания зарегистрированы выше полярной границы авро-

рального овала. Таким образом, рассматриваемые колебания наблюдаются в основном вблизи и выше полярной границы аврорального овала, собственно авроральные широты характеризуются заметно меньшими наблюдаемыми амплитудами колебаний.

Хотя основная спектральная мощность рассматриваемых колебаний сосредоточена на частотах ниже 6 Гц, на более высоких частотах регулярно наблюдаются локальные спектральные максимумы. На рис. 3 для широтных зон выше  $71^\circ$  представлены эмпирические функции распределения (Probability Density Function, PDF) частот локальных спектральных максимумов. Чтобы обеспечить достаточное для анализа количество случаев, нижняя граница коэффициента когерентности установлена на уровне  $\gamma_{\min}^2 = 0.36$ . В Южном полушарии для широтной зоны  $77^\circ-80^\circ$  максимумы распределения лежат на частотах 5–6, 7.8 и 9.3 Гц. В «касповой» зоне  $74^\circ-77^\circ$  также есть максимум на 9.3 Гц, а самый большой максимум наблюдается в полосе частот 7–8 Гц. На широтах  $71^\circ-74^\circ$  распределение имеет вид широкого купола с максимумом на 8.6 Гц. В Северном полушарии распределения для всех широтных интервалов сдвинуты к более низким частотам с главным максимумом на 7.8 Гц для двух более высокоширотных зон и двумя практически равными максимумами на 6.3 и 8.6 Гц для широт  $71^\circ-74^\circ$ .

Таким образом, наиболее благоприятной для появления в ионосфере когерентных на расстояниях в десятки километров вариаций магнитного поля на частотах несколько герц является область геомагнитных широт и интервалов MLT, соответствующих дневному полярному каспу и входным слоям магнитосферы. Спектральные максимумы, лежащие выше 5 Гц, т. е. верхней границы номинального диапазона



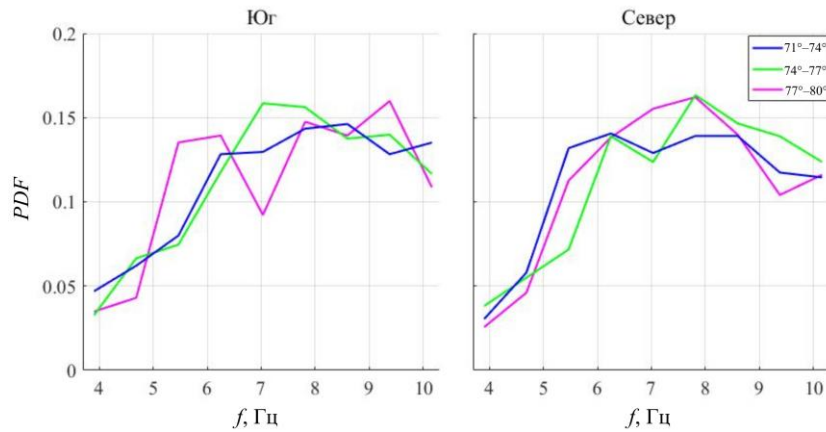


Рис. 3. Эмпирические функции распределения (PDF) частот спектральных максимумов когерентных колебаний в трех широтных зонах для Южного (слева) и Северного (справа) полушарий

геомагнитных пульсаций Pc1, наблюдаются не реже, чем максимумы на частотах ниже 5 Гц.

### 2.2. Анализ отдельных событий

Рассмотрим более детально сигналы во временной области и спектры высокоширотных колебаний на двух спутниках для отдельных интервалов, обозначенных далее как события 1 и 2. Для события 1 (07:30:26 UT 17 сентября 2016 г.) интенсивные колебания регистрировались на геомагнитной широте около 80° в послеполуденном секторе (MLT=15.9). Расстояние между спутниками составляло около 40 км, а разница геомагнитных широт — 0.35°, т. е. спутники располагались почти строго вдоль магнитного меридиана. Согласно данным модели OVATION Prime [Newell et al., 2002, 2010], в 7–8 UT широты спутников лежали несколько выше полярной границы диффузных высыпаний, а дискретные высыпания были слабыми (рис. 4).

Такое положение овала и интенсивность высыпаний соответствует условиям слабой возмущенности, что подтверждается и значениями геомагнитных индексов. Минимальное за четверо суток значение

индекса  $Dst = -34$  нТл наблюдалось за двое суток до исследуемого события — 15 сентября, что соответствует очень слабой магнитной буре, восстановительная фаза которой полностью закончилась к началу суток 17 сентября ( $Dst \geq -2$  нТл). Индекс авроральной активности  $AE$  был меньше 50 нТл в течение последних пяти часов, т. е. все это время не было авроральных возмущений. Такие условия внутри магнитосферы определялись параметрами межпланетной среды с длительным положительным значением вертикальной компоненты ММП и малыми флуктуациями динамического давления солнечного ветра вблизи 2 нПа.

На рис. 5 представлены волновые формы и спектральные параметры вариаций горизонтальных компонент магнитного поля на спутниках А и С. На обоих спутниках в интервале времени 0–1 с наблюдаются колебания с размахом около 2 нТл, а после этого возникает волновой пакет с максимальной амплитудой широтной компоненты  $B_E$  (размах достигает 10 нТл на спутнике А и 12 нТл — на спутнике С). Вариации компоненты  $B_E$ , согласно данным обоих спутников, имеют максимум  $PSD$  на частоте около 4.7 Гц, а максимальные значения  $PSD B_E$  составляют 0.22 нТл<sup>2</sup>/Гц (SWARM-A) и 0.3 нТл<sup>2</sup>/Гц (SWARM-C). Амплитуды колебаний меридиональной компоненты  $B_N$  заметно ниже — в обоих случаях их максимальный размах составляет около 5 нТл. Максимум на частоте 4.7 Гц виден в  $PSD$ -спектре компоненты  $B_N$  только в случае спутника С, а в случае спутника А эта частота отмечена плато. На этой частоте спектральная когерентность  $\gamma^2$  широтной и меридиональной компонент на спутнике С, а также одноименных компонент на двух спутниках превышает 0.5. Рассмотрим разности фаз именно на этой частоте, поскольку на ней наблюдаются и максимум  $PSD$  широтной компоненты, и высокая когерентность. Разность фаз компонент  $B_E$  и  $B_N$  в случае спутника А составляет  $-20^\circ$  (340° на рис. 5, ж) и  $-25^\circ$  — в случае спутника С, при этом в обоих случаях отношение  $PSD B_E$  к  $PSD B_N$  приблизительно равно 3. На частоте 4.7 Гц при высокой когерентности наблюдается также максимум  $PSD$  вариаций компоненты  $B_E$ ;  $PSD$  колебаний, зарегистрированных на двух спутниках, различаются

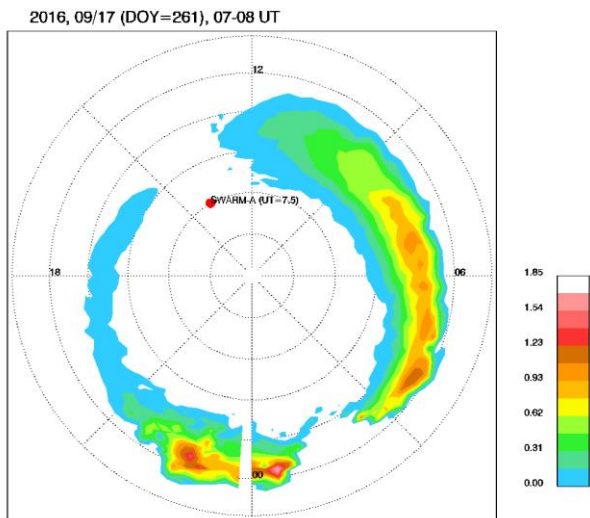


Рис. 4. Интенсивность диффузных высыпаний в Северном полушарии для 07–08 UT 17 сентября 2016 г. (день 261) по результатам модели OVATION Prime

2016, DOY= 261, UT=07:30:26,  $\Phi_1 = 79.65$ ,  $\Phi_2 = 80.00$ , MLT=15:54

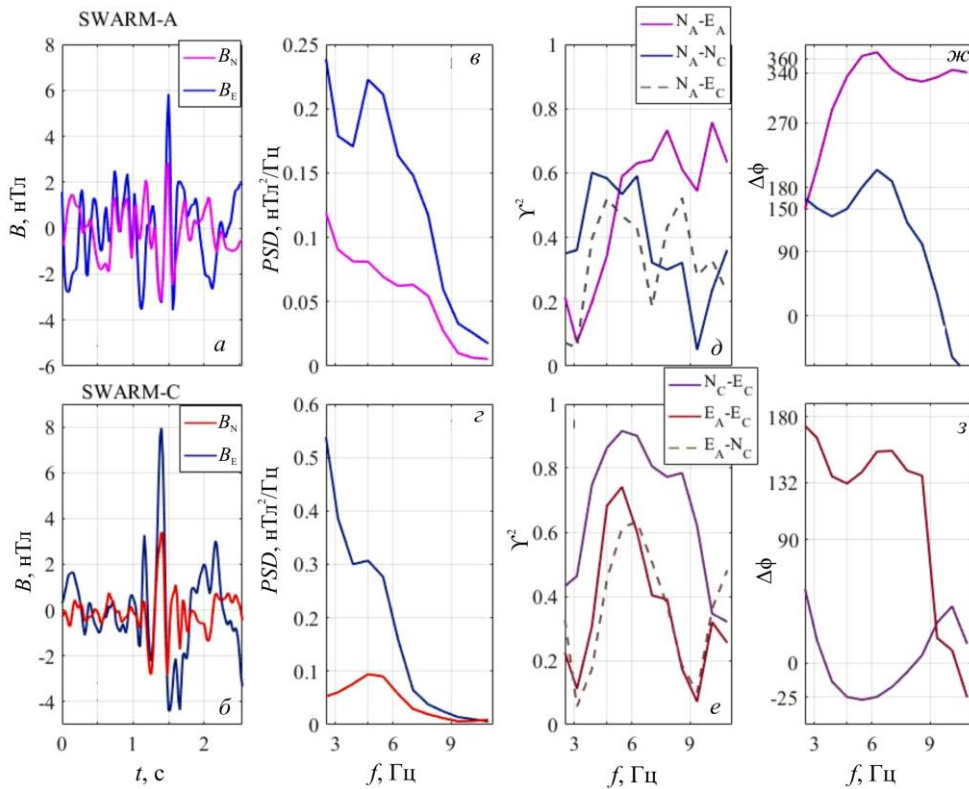


Рис. 5. Когерентные колебания, зарегистрированные в послеполуденном секторе 17 сентября 2016 г. (день 261, событие 1). Слева направо: сигнал во временной области, спектры  $PSD$ , спектральная когерентность и разность фаз. Для временных форм колебаний (а, б) и спектров  $PSD$  (в, з) верхние панели соответствуют спутнику А, а нижние — спутнику С. Для спектров когерентности (д, е) и разности фаз (ж, з) на верхней панели представлены кросс-спектральные параметры компонент по данным каждого спутника (А на верхних и С на нижних панелях) и между компонентами на двух спутниках. Обозначения на легенде имеют следующую структуру: буквы N и E обозначают меридиональную и широтную компоненты поля соответственно, а индекс — спутник, например, обозначение  $N_A-E_C$  соответствует паре компонента  $B_N$  (спутник А) —  $B_E$  (спутник С)

менее чем в 1.5 раза, и колебания характеризуются почти одинаковой поляризацией, что подтверждается малыми различиями в отношениях  $PSD$  и разности фаз компонент  $B_E$  и  $B_N$ . Разность фаз компонент  $B_E$  на двух спутниках составляет  $132^\circ$ . Таким образом, вариации широтной компоненты в данном событии характеризуются значительным изменением фазы при небольшом изменении амплитуды на расстоянии между спутниками, а амплитуда растет с широтой. Это позволяет предположить, что источник колебаний в ионосфере находится на промежуточной между геомагнитными широтами спутников широте ближе к спутнику С.

В событии 2 (18:18:26 UT 3 декабря 2016 г.) колебания с амплитудой несколько нанотесла наблюдались на геомагнитной широте около  $78^\circ$  в предполуденном секторе (MLT=10.66) в условиях низкой геомагнитной возмущенности. Индекс  $Dst$  в течение предшествующих четырех суток не опускался ниже  $-18$  нТл, т. е. не было даже слабой магнитной бури. Текущая авроральная возмущенность была низкой ( $AE < 50$  нТл), но за два часа до события наблюдалась суббуря с  $AE = 140$  нТл. Как и в предыдущем событии, не было существенных вариаций динами-

ческого давления солнечного ветра, его абсолютное значение колебалось около 2 нПа, но, в отличие от события 1, вертикальная компонента ММП была отрицательной:  $B_z \approx -2$  нТл.

Временные формы и спектры сигнала представлены на рис. 6: видны более существенные, чем в событии 1, искажения сигнала на расстоянии между спутниками. Расстояние между спутниками составляло 75 км при разнице их геомагнитных широт около  $0.5^\circ$ , т. е. они были разнесены на 55 км вдоль меридиана. Амплитуда сигнала была выше на спутнике С, расположенном ближе к полудню и на более высокой широте, чем спутник А. Максимальный размах колебаний широтной компоненты  $B_E$  составил около 20 нТл на обоих спутниках, а меридиональной  $B_N$  — 18 нТл на спутнике С и 10 нТл на спутнике А. При этом малый сдвиг по времени начала возмущения и почти синхронные вариации амплитуды позволяют предположить общее происхождение сигнала.

Главный спектральный максимум компоненты  $B_E$  лежит на частоте 4.7 Гц в случае спутника А и 4 Гц в случае спутника С. Кроме того, в обоих случаях в спектрах виден дополнительный максимум в окрестности 9 Гц. При этом только главный спектральный



2016, DOY= 338, UT=18:18:26,  $\Phi_1 = 77.96$ ,  $\Phi_2 = 78.48$ , MLT=10:39

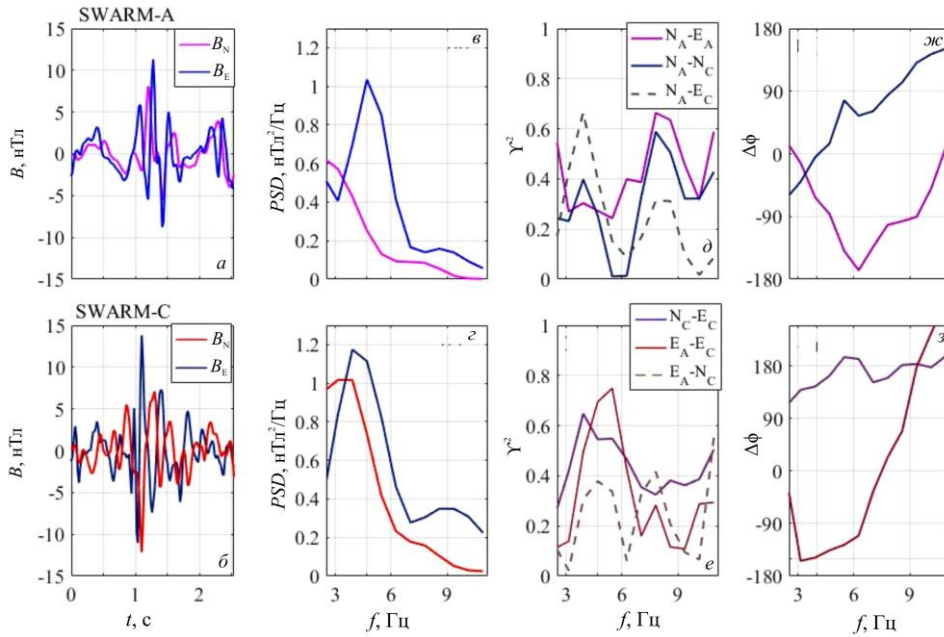


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, для когерентных колебаний, зарегистрированных в предполуденном секторе 3 декабря 2016 г. (день 338, событие 2)

максимум на 4.7 Гц попадает в область высокой спектральной когерентности  $\gamma^2 \approx 0.6$  вариаций компонент  $B_E$  и  $B_N$  на спутнике С и широтных компонент на двух спутниках. В области второго максимума когерентность широтных компонент оказывается низкой. Таким образом, разность фаз вариаций компоненты  $B_E$  на двух спутниках имеет смысл оценивать только на частоте главного спектрального максимума 4.7 Гц. Она составляет  $-150^\circ$ . На этой же частоте разность фаз горизонтальных компонент на спутнике С составляет  $135^\circ$ , что соответствует эллиптической поляризации.

Согласно данным обоих спутников, на частотах ниже 3.5 Гц доминирует меридиональная, а выше — широтная компонента, но в случае спутника А при  $f > 3.5$  Гц отношение мощностей  $B_N/B_E$  существенно ниже, чем в случае спутника С. Для меридиональной компоненты в случае спутника А наблюдается максимум  $PSD$  на левой границе спектра (2.7 Гц), а в случае спутника С — на частоте 4 Гц. Кроме того, в спектрах меридиональной компоненты в окрестности 7 Гц наблюдаются замедление спада (спутник С) и плато (спутник А). Максимумы в спектре когерентности отмечают как частоту максимума спектра  $PSD$  4 Гц, на которой  $\gamma^2 \approx 0.4$ , так и частоту 7.8 Гц, на которой  $\gamma^2 \approx 0.6$ . Разность фаз компоненты  $B_N$  на этих частотах составляет около 0 и  $90^\circ$  соответственно, т. е. существенно различается на частотах двух максимумов, что характерно для гармоник разной четности.

Для этого события отношения  $PSD$  и разности фаз компонент  $B_N$  и  $B_E$  на двух спутниках различны и существенно зависят от частоты, так что простая оценка положения источника невозможна. Такое пространственное распределение амплитуды и фазы, вероятно, связано с возбуждением резонансных и волноводных мод в ионосфере.

Для обоих событий возмущения начинаются практически синхронно, а на частотах основных спектральных максимумов наблюдается высокая когерентность. Это позволяет интерпретировать наблюдаемые вариации магнитного поля как пульсации. Их амплитуда значительно выше амплитуды фоновых вариаций магнитного поля в ионосфере, которая не превышает 0.1 нТл. Амплитуда вертикальной компоненты (не показана на рисунке) более чем на порядок ниже амплитуды горизонтальных компонент, что соответствует альфвеновской волне. В первом событии на расстоянии между спутниками спектры колебаний меняются слабо, а во втором — существенно. Это дает оценку пространственного масштаба колебаний в первом случае больше расстояния между спутниками, а во втором — порядка расстояния между спутниками. Таким образом, рассмотренные возмущения могут быть представлены в виде пучка альфвеновских волн диаметром от нескольких десятков до нескольких сотен километров. Рассмотрим прохождение такого пучка через ионосферу для события 1.

### 3. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ПОЛЯ. МОДЕЛЬ

Пространственная структура поля волны может быть оценена в рамках модели прохождения пучка альфвеновских волн через ионосферу [Fedorov et al., 2018]. Параметры ионосферы учитывались по модели IRI-2007 [Bilitza, Reinisch, 2008]. Для события 1 высотные распределения амплитуды трех компонент магнитного поля для двух значений радиуса пучка  $\rho_0$  представлены на рис. 7. Расстояние от центра пучка составляет  $0.8\rho_0$ , что близко к положению максимума радиального распределения амплитуды. На ионосферных высотах  $h > 150$  км преобладает ази-

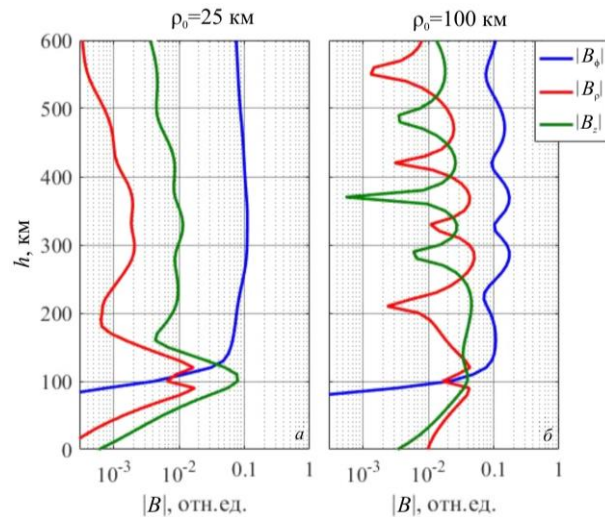


Рис. 7. Высотное распределение амплитуды компонент магнитного поля для падающего на ионосферу альфвеновского пучка конечного радиуса  $\rho_0$  для частоты 4 Гц. Условия в ионосфере соответствуют событию 1

мутальная компонента магнитного поля  $B_\phi$ , а на земле — радиальная  $B_r$ . Предполагая, что центр пучка находится между спутниками и учитывая, что спутники расположены почти строго вдоль геомагнитного меридиана, получаем, что в ионосфере компонента  $B_\phi$  примерно соответствует широтной, а  $B_r$  — меридиональной компоненте магнитного поля. На ионосферных высотах амплитуда осциллирует с высотой с пространственным периодом около 100 км, а положения экстремумов зависят от радиуса пучка.

Радиальные распределения амплитуд компонент магнитного поля на высоте спутника и на поверхности Земли приведены на рис. 8. Максимум амплитуды доминирующей в ионосфере азимутальной компоненты приходится на радиальные расстояния  $(0.7 \div 0.8)\rho_0$ . На поверхности Земли в узкой области вблизи проекции оси пучка преобладает вертикальная, а на расстояниях больше 30 км от нее — радиальная компонента магнитного поля.

Главным отличием наземного распределения от ионосферного является более слабая зависимость амплитуды магнитного поля от радиального расстояния. На рис. 9 приведена зависимость отношения  $R_{GI}$  амплитуды магнитного поля на земле к максимальной амплитуде в ионосфере от расстояния до центра пучка. Положение максимума и максимальное значение  $R_{GI}$  зависят от радиуса пучка  $\rho_0$ . Отношение расстояния от центра пучка до максимума  $\rho_{max}$  к  $\rho_0$  растет, а значение  $R_{GI}$  в максимуме уменьшается при уменьшении радиуса пучка ( $\rho_{max}/\rho_0 = 1$  и  $R_{GI} = 6 \cdot 10^{-2}$  при  $\rho_0 = 100$  км, а при  $\rho_0 = 25$  км  $\rho_{max}/\rho_0 = 2$  и  $R_{GI} = 5 \cdot 10^{-3}$ ). Таким образом, предположив, что зарегистрированные в событии 1 пульсации наблюдались вблизи максимума радиального распределения амплитуды в ионосфере, получаем оценку снизу для амплитуды на поверхности Земли. В зависимости от радиуса пучка она может составлять от нескольких сотых до нескольких десятых нанотесла. В последнем случае эти пульсации могут быть зарегистрированы на Земле даже с помощью магнитонасыщенного (flux-gate) магнитометра на расстоянии до 200 км от проекции центра пучка.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемые сигналы могут иметь как магнитосферное, так и атмосферное происхождение, связанное с проникновением в ионосферу шумановского резонанса [Ni, Zhao, 2005; Surkov et al., 2013]. До сих пор экспериментальные подтверждения проникновения шумановского резонанса на ионосферные высоты наблюдались только для электрической компоненты, хотя возможно, что слабые максимумы на рис. 1, наблюдаемые на низких и средних широтах, могут иметь атмосферное происхождение. Возможным источником таких сигналов могут быть отдельные медленные разряды, вызываемые направленным вверх током с дипольным моментом порядка или больше 100 Кл км [Rakov, Uman, 2003]. Теоретический анализ структуры поля от атмосферного разряда с дипольным моментом  $10^3$  Кл км в условиях ночной ионосферы [Mazur et al., 2018] показал, что поле от разряда медленно (как  $1/\rho$ ) спадает с горизонтальным расстоянием, что позволяет регистрировать сигнал с амплитудой выше 1 нТл на расстояниях порядка  $10^3$  км от точки над молниевым разрядом. На расстояниях до 400 км положения спектральных максимумов определяются ИАР, а на больших расстояниях спектр в основном определяется волноводной модой и в нем появляются максимумы на частотах выше 4 Гц. Разряды с дипольным моментом выше 100 Кл км составляют несколько процентов от всех регистрируемых молний, и вероятность их появления падает с ростом интенсивности, так что разряды с дипольным моментом порядка или больше  $10^3$  Кл км являются редкими событиями, для которых можно непосредственно отследить наличие ионосферных возмущений. В пользу атмосферного происхождения наблюдаемых на низких и средних широтах максимумов свидетельствовали бы их временное совпадение с разрядами экстремальной интенсивности, а также спектры, согласующиеся с расчетными. Анализ пространственного распределения по данным спутников SWARM возможен для отдельных событий, для которых расстояние между спутниками А/С и В составляет  $10^2 - 10^3$  км.

Для высокоширотных колебаний, исследованных в настоящей работе, наиболее вероятным представляется магнитосферный источник. В пользу этой гипотезы говорит совпадение зон наибольшей мощности колебаний с широтами ионосферных проекций полярного каспа/клефта и входных слоев магнитосферы. В этих областях главное магнитное поле в магнитосфере существенно неоднородно по величине и направлению, что может приводить к возникновению неустойчивых распределений частиц, в том числе к температурной анизотропии. Поперечная анизотропия температуры протонов является условием возбуждения ионно-циклотронных колебаний [Сагдеев, Шафранов, 1960]. Во внутренней магнитосфере область генерации ионно-циклотронных волн лежит вблизи экватора на расстояниях не больше  $11^\circ$  [Loto'aniu et al., 2005], а их частоты попадают в диапазон Pc1. Исследованные ионосферные колебания более высоких частот наблюдаются преимущественно на широтах вблизи и выше полярной границы

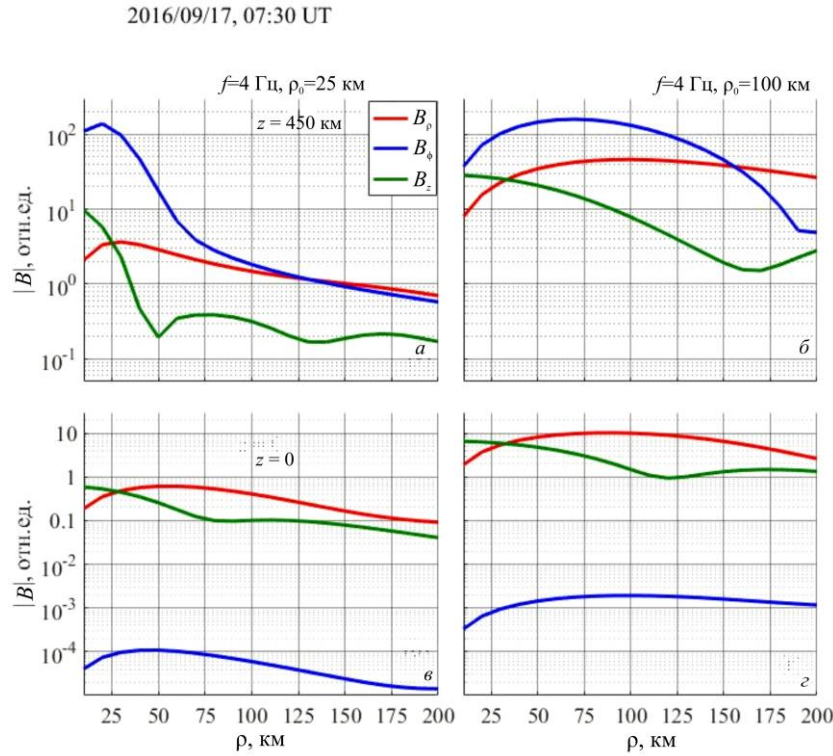


Рис. 8. Радиальное распределение амплитуды компонент магнитного поля на высоте спутника (верхние панели) и на поверхности Земли (нижние панели) для той же геометрии падающего волнового пучка и частоты, что и на рис. 7

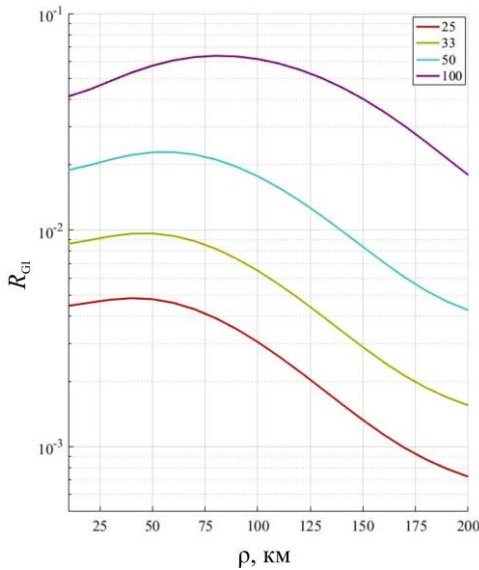


Рис. 9. Радиальное распределение отношения  $R_{GI}$  амплитуды магнитного поля на поверхности Земли к максимальной амплитуде на высоте спутника в зависимости от радиуса волнового пучка для частоты 4 Гц при тех же условиях в ионосфере, что и на рис. 7, 8

аврорального овала, а их частоты соответствуют частотам протонно-циклотронного резонанса для магнитного поля  $\mathbf{B}$  порядка сотен нанотесла. Для областей полярного каспа/клефта, мантии и входных слоев значения  $\mathbf{B}$  соответствуют промежуточным магнитным широтам ( $30\text{--}60^\circ$  от экваториальной плоскости магнитосферы).

Интенсивные колебания с частотами от долей герца до нескольких герц вне экваториальной области магнитосферы на силовых линиях, соответствующих

проекциям каспа/клефта, регистрировались на спутнике POLAR [Le et al., 2011]. Это связано с тем, что область генерации ионно-циклотронных волн привязана к области минимального по абсолютному значению магнитного поля, которое в окрестности полярного каспа/клефта и во входных слоях магнитосферы смещено от экватора [Shabansky, 1971]. Статистическое распределение частот появления ионно-циклотронных волн в магнитосфере в диапазоне частот Pc1–2 свидетельствует о преимущественной регистрации их в дневном секторе для  $L > 8$  (см. [Usanova et al., 2012] и цитируемую в статье литературу). Такая возможность исследуется теоретически в работах [McCollough et al., 2010, 2012]. В качестве внешних причин возникновения неустойчивых популяций ионов рассматриваются магнитная буря [Blum et al., 2009] или резкое изменение динамического давления солнечного ветра [McCollough et al., 2010].

В работе [Vines et al., 2019] приводится экспериментальное свидетельство существования удаленного от экватора (на магнитной широте около  $25^\circ$ ) источника ионно-циклотронных волн в послеполуденном секторе внешней магнитосферы. Одновременные наблюдения электромагнитного поля и распределений ионов позволили локализовать источник колебаний и установить, что наблюдаемые распределения ионов соответствуют распределениям, необходимым для возбуждения ионно-циклотронных волн. При этом условия вне магнитосферы и индексы геомагнитной активности соответствовали слабой возмущенности. Таким образом, исследование [Vines et al., 2019] показало возможность существования неустойчивых распределений ионов во внешней магни-



тосфере и связанных с ними ионно-циклотронных волн вне сильных возмущений, что косвенно подтверждается результатами настоящей работы.

Появление ЭМИЦ-волн во внешней магнитосфере на больших расстояниях от экватора было зафиксировано на спутниках миссии Cluster [Rème et al., 2001], орбита которых покрывала интервал  $L$ -оболочек от  $4R_E$  до  $20R_E$  и геомагнитных широт от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ . Статистический анализ частоты появления ЭМИЦ-волн в магнитосфере за десять лет (2001–2010 гг.) показал [Allen et al., 2015], что в дневном секторе (9–15 MLT) максимум частоты появления волн во внешней магнитосфере  $L > 8$  приходится на геомагнитные широты  $15^\circ$ – $30^\circ$  и превышает 10 %, а на расстоянии от экватора  $30^\circ$ – $45^\circ$  снижается до нескольких процентов. При этом в вечернем секторе (15–21 MLT) даже для  $L > 14$  для магнитных широт  $30^\circ$ – $45^\circ$  средняя частота появления составляет несколько процентов, достигая для отдельных секторов 10 %. Зависимость частоты появления магнитосферных ЭМИЦ-волн от  $L$  и MLT по данным работы [Allen et al., 2015] качественно согласуется с показанными на рис. 2 частотами появления и PSD исследованных в настоящей работе ионосферных колебаний. Анализ параметров холодной плазмы и горячих протонов с энергиями от 10 до 40 кэВ за тот же период наблюдений был выполнен в работе [Allen et al., 2016]. Во внешней магнитосфере для всех значений магнитных широт, на которых наблюдались ЭМИЦ-волны, были обнаружены повышенные уровни поперечной анизотропии температуры, отношения  $\beta$  давления горячих протонов к магнитному давлению, причем максимальное значение  $\beta$  наблюдалось на магнитной широте  $\sim 45^\circ$ . Исследованные в настоящей работе высокоширотные ионосферные колебания в диапазоне нескольких герц, вероятно, являются проявлением магнитосферных ЭМИЦ-волн, генерируемых анизотропными распределениями протонов во внеэкваториальных областях внешней магнитосферы [Allen et al., 2015, 2016].

Другим источником ионосферных колебаний диапазона выше номинального Pc1 могут быть магнитосферные ЭМИЦ-волны более низких частот, генерируемые на меньших расстояниях от экватора. Liu et al. [2019] показали одновременное появление пульсаций Pc1 по измерениям на четырех спутниках серии MMS во внешней магнитосфере примерно на том же расстоянии от экватора, что и в работе [Vines et al., 2019]. Расстояние между спутниками в магнитосфере составляло 50–100 км, а меридиональное расстояние между ионосферными проекциями —  $0.02^\circ$ , т. е. около 2 км. Динамические спектры пульсаций схожи, но не идентичны на всех спутниках MMS, причем различия заметны визуально даже на приведенных в статье рисунках, где полное время составляет 90 мин. Таким образом, Pc1-пульсации магнитосферного происхождения, имеющие на высоте ионосферы километровые поперечные масштабы, в ионосфере могут давать вклад в вариации магнитного поля с более высокими частотами, регистрируемые низколетящими спутниками.

Выполненный в настоящей работе анализ когерентных ионосферных колебаний с использованием временного окна 2.56 с позволяет разделить временные и пространственные вариации поля на временных масштабах порядка или больше 10 с, а используемый амплитудный порог позволяет классифицировать наблюдаемые одновременно на двух спутниках волновые пакеты длительностью несколько периодов, подобные показанным на рис. 5, 6, как колебания, спектры которых слабо меняются при измерении неподвижным сенсором на низколетящем спутнике. Промежуточная область частот от долей до единиц герц, километровых пространственных масштабов и длительностей волнового пакета от 3 до 10 с требует специальных методов анализа для разделения пространственных и временных вариаций.

## ВЫВОДЫ

1. Вариации геомагнитного поля на частотах 2.5–12 Гц в F-слое ионосферы выше максимума электронной концентрации, зарегистрированные на спутниках SWARM, обнаруживают максимум вероятности появления и амплитуды на широтах вблизи и выше полярной границы аврорального овала, соответствующих областям входных слоев магнитосферы и дневного полярного каспа-клефта.
2. Высокая когерентность вариаций на двух разнесенных спутниках позволяет идентифицировать их как волновые возмущения с масштабом большим, чем расстояние между спутниками.
3. Возможным источником этих возмущений являются ионно-циклотронные волны во внеэкваториальных областях внешней магнитосферы.

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания. Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН (все авторы) и ГЦ РАН (В.А. Пилипенко). Данные измерений магнитного поля на спутниках SWARM доступны на сайте Европейского космического агентства (ESA) [<https://swarm-diss.esa.int>]. Данные по межпланетному магнитному полю, пересчитанные к подсолнечной точке магнитосферы и геомагнитным индексам — на сайте [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гульельми А.В., Потапов А.С., Довбня Б.В. О происхождении частотной модуляции серпентинной эмиссии. *Солнечно-земная физика*. 2015. Т. 1, № 2. С. 85–90. DOI: [10.12737/9617](https://doi.org/10.12737/9617).
- Дженкинс Г., Ваттс Д. *Спектральный анализ и его приложения*. Вып. 2. М.: Мир, 1972. 287 с.
- Ермакова Е.Н., Яхнин А.Г., Яхнина Т.А. и др. Спорадические геомагнитные пульсации на частотах до 15 Гц в период магнитной бури 7–14 ноября 2004 г.: Особенности амплитудных и поляризационных спектров и связь с ионно-циклотронными волнами в магнитосфере. *Известия вузов. Радиофизика*. 2015. Т. 58, № 8. С. 607–621.
- Леонович А.С., Мазур В.А., Сенаторов В.А. Альфвеновский волновод. *ЖЭТФ*. 1983. Т. 85, вып. 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).

- Пархомов В.А., Застенкер Г.Н., Рязанцева М.О. и др. Всплески геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2–5 Гц, возбуждаемые большими скачками давления солнечного ветра. *Космические исследования*. 2010. Т. 48, № 1. С. 87–101.
- Пархомов В.А., Довбня Б.В., Бородкова Н.А. и др. Импульсные всплески геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2–7 Гц как первый сигнал о взаимодействии межпланетных ударных волн с магнитоферой. *Солнечно-земная физика*. 2014. Т. 25. С. 21–28.
- Пилипенко В.А., Полозова Т.Л., Энгебретсон М. Пространственно-временная структура ионно-циклотронных волн в верхней ионосфере по наблюдениям на спутниках ST-5. *Космические исследования*. 2012. Т. 50, № 5. С. 355–365.
- Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альфвеновский резонатор. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 1981. Т. 21, № 5. С. 610–614.
- Сагдеев Р.З., Шафранов В.Д. О неустойчивости плазмы с анизотропным распределением скоростей в магнитном поле. *ЖЭТФ*. 1960. Т. 39. С. 181–184.
- Фельдштейн Я.И. Некоторые вопросы морфологии полярных сияний и магнитных возмущений в высоких широтах. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 1963. Т. 3, № 2. С. 227–239.
- Allen R.C., Zhang J.-C., Kistler L.M., et al. A statistical study of EMIC waves observed by Cluster: 1. Wave properties. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120. P. 5574–5592. DOI: [10.1002/2015JA021333](https://doi.org/10.1002/2015JA021333).
- Allen R.C., Zhang J.-C., Kistler L.M., et al. A statistical study of EMIC waves observed by Cluster: 2. Associated plasma conditions. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. Vol. 121. P. 6458–6479. DOI: [10.1002/2016JA022541](https://doi.org/10.1002/2016JA022541).
- Arnoldy R.L., Engebretson M.J., Denton R.E., et al. Pc 1 waves and associated unstable distributions of magnetospheric protons observed during a solar wind pressure pulse. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, A07229. DOI: [10.1029/2005JA011041](https://doi.org/10.1029/2005JA011041).
- Belyaev P.P., Bosinger T., Isaev S.V., et al. First evidence at high latitude for the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 4305–4318. DOI: [10.1029/1998JA900062](https://doi.org/10.1029/1998JA900062).
- Bilitza D., Reinisch B. International Reference Ionosphere. Improvements and new parameters. *Adv. Space Res.* 2008. Vol. 42. P. 599–609. DOI: [10.1016/j.asr.2007.07.048](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.07.048).
- Blum L.W., MacDonald E.A., Gary S.P., et al. Ion observations from geosynchronous orbit as a proxy for ion cyclotron wave growth during storm times. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, A10214. DOI: [10.1029/2009JA014396](https://doi.org/10.1029/2009JA014396).
- Bogdanova Y.V., Fazakerley A.N., Owen C.J., et al. Correlation between suprathermal electron bursts, broadband extremely low frequency waves, and local ion heating in the midlatitude cleft/low-latitude boundary layer observed by Cluster. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109, A12226. DOI: [10.1029/2004JA010554](https://doi.org/10.1029/2004JA010554).
- Buchsbaum S.J. Ion resonance in a multicomponent plasma. *Phys. Rev. Lett.* 1960. Vol. 5, no. 11. P. 495–497. DOI: [10.1103/PhysRevLett.5.495](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.5.495).
- Engebretson M.J., Onsager T.G., Rowland D.E., et al. On the source of Pc1–2 waves in the plasma mantle. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, A06201. DOI: [10.1029/2004JA010515](https://doi.org/10.1029/2004JA010515).
- 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).
- 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.: Space Phys.* 2018. Vol. 123. P. 3965–3982. DOI: [10.1029/2018JA025338](https://doi.org/10.1029/2018JA025338).
- Francia P., Regi M., de Laetis M., et al. A case study of correspondence between Pc1 activity and ionospheric irregularities at polar latitudes. *Earth Planets Space*. 2020. Vol. 72, 59. DOI: [10.1186/s40623-020-01184-4](https://doi.org/10.1186/s40623-020-01184-4).
- Holzworth R.H., Meng C.-I. Mathematical representation of the auroral oval. *Geophys. Res. Lett.* 1975. Vol. 2. P. 377–380. DOI: [10.1029/GL002i009p00377](https://doi.org/10.1029/GL002i009p00377).
- Jacobsen K.S., Moen J.I. On the correlation between broad-band ELF wave power and ion fluxes in the cusp. *Ann. Geophys.* 2010. Vol. 28. P. 1249–1261. DOI: [10.5194/angeo-28-1249-2010](https://doi.org/10.5194/angeo-28-1249-2010).
- Juusola L., Kauristie K., Vanhamäki H., et al. Comparison of auroral ionospheric and field-aligned currents derived from Swarm and ground magnetic field measurements. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. Vol. 121. P. 9256–9283. DOI: [10.1002/2016JA022961](https://doi.org/10.1002/2016JA022961).
- Kataoka R., Fukunishi H., Lanzerotti L.J. Statistical identification of solar wind origins of magnetic impulse events. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, A12. P. 1436. DOI: [10.1029/2003JA010202](https://doi.org/10.1029/2003JA010202).
- Kim H., Lessard M.R., Engebretson M.J., Young M.A. Statistical study of Pc1–2 wave propagation characteristics in the high-latitude ionospheric waveguide. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116, A07227. DOI: [10.1029/2010JA016355](https://doi.org/10.1029/2010JA016355).
- Kim H., Shiokawa K., Park J., et al. Statistical analysis of Pc1 wave ducting deduced from Swarm satellites. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. Vol. 126, e2020JA029016. DOI: [10.1029/2020JA029016](https://doi.org/10.1029/2020JA029016).
- Lanzerotti L.J., Konik R.M., Wolfe A., et al. MacLennan, Cusp latitude magnetic impulse events: 1. Occurrence statistics. *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96. P. 14009–14022. DOI: [10.1029/91JA00567](https://doi.org/10.1029/91JA00567).
- Le Queau D., Roux A. Heating of oxygen ions by resonant absorption of Alfvén waves in a multicomponent plasma. *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. P. 14929–14946. DOI: [10.1029/92JA01052](https://doi.org/10.1029/92JA01052).
- Le G., Chi P.J., Strangeway R.J., Slavin J.A. Observations of a unique type of ULF wave by low-altitude Space Technology 5 satellites. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116, iss. A08. DOI: [10.1029/2011JA016574](https://doi.org/10.1029/2011JA016574).
- Liu S., Xia Z., Chen L., et al. Magnetospheric Multiscale Observation of quasiperiodic EMIC waves associated with enhanced solar wind pressure. *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46, iss. 13. P. 7096–7104. DOI: [10.1029/2019GL083421](https://doi.org/10.1029/2019GL083421).
- Loto'aniu T.M., Fraser B.J., Waters C.L. Propagation of electromagnetic ion cyclotron wave energy in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, iss. A07. DOI: [10.1029/2004JA010816](https://doi.org/10.1029/2004JA010816).
- Lühr H., Park J., Gjerloev J.W., et al. Field-aligned currents' scale analysis performed with the Swarm constellation. *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42. P. 1–8. DOI: [10.1002/2014GL062453](https://doi.org/10.1002/2014GL062453).
- Mazur N.G., Fedorov E., Pilipenko V.A., Vakhnina V. ULF electromagnetic field in the upper ionosphere excited by lightning. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. Vol. 123. P. 6692–6702. DOI: [10.1029/2018JA025622](https://doi.org/10.1029/2018JA025622).
- McCollough J.P., Elkington S.R., Usanova M.E., et al. Physical mechanisms of compressional EMIC wave growth. *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115, A10214. DOI: [10.1029/2010JA015393](https://doi.org/10.1029/2010JA015393).
- McCollough J.P., Elkington S.R., Baker D.N. The role of Shabansky orbits in compression-related electromagnetic ion cyclotron wave growth. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117, A01208. DOI: [10.1029/2011JA016948](https://doi.org/10.1029/2011JA016948).
- Newell P.T., Sotirelis T., Ruohoniemi J.M., et al. OVATION: Oval variation, assessment, tracking, intensity, and online nowcasting. *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 1039–1047. DOI: [10.5194/angeo-20-1039-2002](https://doi.org/10.5194/angeo-20-1039-2002).
- Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., et al. Predictive ability of four auroral precipitation models as evaluated using Polar UVI global images. *Space Weather*. 2010. Vol. 8, S12004. DOI: [10.1029/2010SW000604](https://doi.org/10.1029/2010SW000604).
- Ni B.-B., Zheng-Yu Zhao. Spatial observations of Schumann resonance at the ionospheric altitude. *Chinese Journal of Geophysics*. 2005. Vol. 48. P. 818–826.

Nykyri K., Grison B., Cargill P.J., et al. Origin of the turbulent spectra in the high-altitude cusp: Cluster spacecraft observations. *Ann. Geophys.* 2006. Vol. 24. P. 1057–1075. DOI: [10.5194/angeo-24-1057-2006](https://doi.org/10.5194/angeo-24-1057-2006).

Olsen N., Friis-Christensen E., Floberghagen R., et al. The Swarm satellite constellation application and research facility (SCARF) and Swarm data products. *Earth Planets Space.* 2013. Vol. 64. P. 1189–1200. DOI: [10.5047/eps.2013.07.001](https://doi.org/10.5047/eps.2013.07.001).

Papitashvili V.O., Papitashvili N.E., King J.H. Magnetospheric geomagnetic coordinates for space physics data presentation and visualization. *Adv. Space Res.* 1997. Vol. 20. P. 1097–1100. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)00565-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00565-6).

Rakov V.A., Uman M.A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge U. Press, New York, 2003. 687 p.

Rème H., Aoustin C., Bosqued J.M., et al. First multi-spacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster ion spectrometry (CIS) experiment. *Ann. Geophys.* 2001. Vol. 19, is.10-12. P. 1303–1354. DOI: [10.5194/angeo-19-1303-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-1303-2001).

Sato M., Fukunishi H., Lanzerotti L.J., MacLennan C.G. Magnetic impulse events and related Pc1 bursts observed by the Automatic Geophysical Observatories network in Antarctica. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 19971–19982. DOI: [10.1029/1999JA900111](https://doi.org/10.1029/1999JA900111).

Shabansky V.P. Some processes in the magnetosphere. *Space Sci. Rev.* 1971. Vol. 12. P. 299–418. DOI: [10.1007/BF00165511](https://doi.org/10.1007/BF00165511).

Simões F., Pfaff R.F., Freudenreich H. Observation of Schumann resonances in the Earth's ionosphere. *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38, L22101. DOI: [10.1029/2011GL049668](https://doi.org/10.1029/2011GL049668).

Slavin J.A., Le G., Strangeway R.J., et al. Space Technology 5 multi-point measurements of near-Earth magnetic fields: Initial results. *Geophys. Res. Lett.* 2008. vol. 35, L02107. DOI: [10.1029/2007GL031728](https://doi.org/10.1029/2007GL031728).

Surkov V.V., Nosikova N.S., Plyasov A.A., et al. Penetration of Schumann resonances into the upper ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013. Vol. 97. P. 65–74. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.02.015](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.02.015).

Usanova M.E., Mann I.R., Bortnik J., et al. THEMIS observations of electromagnetic ion cyclotron wave occurrence: Dependence on AE, SYM-H, and solar wind dynamic pressure. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117, A10218. DOI: [10.1029/2012JA018049](https://doi.org/10.1029/2012JA018049).

Vines S.K., Allen R.C., Anderson B.J., et al. EMIC waves in the outer magnetosphere: Observations of an off-equator source region. *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46. P. 5707–5716. DOI: [10.1029/2019GL082152](https://doi.org/10.1029/2019GL082152).

URL: <https://swarm-diss.esa.int> (дата обращения 16 ноября 2022 г.).

URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 16 ноября 2022 г.).

*Как цитировать эту статью:*

Ягова Н.В., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., Мазур Н.Г., Мартинес-Беденко В.А. Колебания геомагнитного поля в диапазоне 2.5–12 Гц в F-слое ионосферы по данным спутников SWARM. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 1. С. 37–50. DOI: [10.12737/szf-91202305](https://doi.org/10.12737/szf-91202305).