

## ЕСТЕСТВЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ДИАПАЗОНА 4–12 Гц ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СПУТНИКАХ SWARM И СЕТИ МАГНИТОМЕТРОВ CARISMA

### NATURAL ELECTROMAGNETIC OSCILLATIONS IN 4–12 Hz FREQUENCY RANGE AS MEASURED BY SWARM SATELLITES AND CARISMA MAGNETOMETER NETWORK

**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*

**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*

**Аннотация.** Рассмотрены вариации магнитного поля в диапазоне 4–12 Гц в верхней ионосфере и на Земле. Исследуется наземный отклик на когерентные на двух спутниках SWARM колебания вблизи и выше высокочастотной границы номинального диапазона геомагнитных пульсаций Pc1. Для анализа наземных колебаний используются данные сети магнитометров CARISMA. Большая часть колебаний в ионосфере регистрируется на геомагнитных широтах выше 65°, т. е. от авроральной зоны до области полярного каспа-клефта. Колебания на тех же частотах фиксируются на авроральных и субавроральных наземных станциях на расстояниях от 1500 до 3000 км до проекции спутника. Определенные из наблюдательных данных значения отношения  $R_{GI}$  амплитуды колебаний на Земле к амплитуде в ионосфере сравниваются со значениями, рассчитанными для альфвеновского пучка конечного радиуса, падающего на квазиреальную ионосферу [Fedorov et al., 2018]. Радиальное распределение  $R_{GI}$  зависит от частоты колебаний и высотного распределения ионосферных параметров, которое определяется в основном сезоном и местным временем. Наиболее вероятные значения  $R_{GI}$  лежат в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$ . Показано, что определенные из измерений значения  $R_{GI}$  согласуются с расчетными для радиуса падающего пучка в несколько сотен километров.

**Ключевые слова:** ионосфера, геомагнитные пульсации, ионно-циклотронные волны.

**Abstract.** We examine magnetic field variations at 4–12 Hz frequencies in the upper ionosphere and on Earth. The ground response to the coherent oscillations at two SWARM satellites near and above the high frequency boundary of the nominal Pc1 range is studied. We use CARISMA data to analyze ground pulsations. Ionospheric oscillations are predominantly registered at geomagnetic latitudes above 65°, i. e. from the auroral zone to the polar cusp-cleft region. The oscillations at the same frequencies are recorded at auroral and subauroral ground stations at distances from 1500 to 3000 km from satellite footprint. Ratio  $R_{GI}$  of the oscillation amplitude on Earth to that in the ionosphere retrieved from the observed data is compared to the values calculated for a finite radius Alfvén beam incident onto a quasi-real ionosphere. [Fedorov et al., 2018]. Radial distribution of  $R_{GI}$  depends on the oscillation frequency and the altitude distribution of ionospheric parameters controlled mostly by season and local time. The most probable values of  $R_{GI}$  range from  $10^{-3}$  to  $10^{-1}$ . The  $R_{GI}$  values obtained from the observed data agree with model ones at incident beam radius of about several hundred kilometers.

**Keywords:** ionosphere, geomagnetic pulsations, MHD waves.

## ВВЕДЕНИЕ

Физически геомагнитные пульсации Pc1 являются проявлением электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн. Номинальный частотный диапазон пуль-

саций Pc1 лежит в интервале от 0.2 до 5 Гц и ограничен сверху частотами ионно-циклотронного резонанса в вершине силовой линии. Колебания более высоких частот могут быть связаны с резкими поджа-

тиями магнитосферы [Ермакова и др., 2015] или внеэкваториальной генерацией [Rème et al., 2001; Allen et al., 2015; Vines et al., 2019]. Эта область частот соответствует высшим гармоникам ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР) и ионосферного волновода [Поляков, Рапопорт, 1981; Belyaev et al., 1999], которые могут исказить спектральный состав Pc1-пульсаций при прохождении через ионосферу к земной поверхности.

Одноточечные измерения вариаций магнитного поля на низколетящем спутнике не позволяют отделить колебания от прохождения спутником пространственных структур. Определение по таким измерениям частоты колебаний в системе координат, неподвижной относительно Земли, невозможно из-за доплеровского эффекта [Le et al., 2011]. Многоспутниковые измерения, такие как миссии ST5 и SWARM, позволяют разделить пространственные структуры и колебания [Engelbreton et al., 2008; Olsen et al., 2013].

По данным двух близко расположенных спутников SWARM-A/C удалось выделить ранее не изученный тип волновых УНЧ-возмущений — короткие волновые пакеты диапазона 2.5–10 Гц, т. е. выше номинального диапазона Pc1-пульсаций [Ягова и др., 2023]. Максимумы вероятности появления и амплитуды этих колебаний соответствовали областям дневного полярного каспа-клефта. Наблюдаемые частоты колебаний соответствуют частоте протонно-циклотронного резонанса на удалении от экватора больше 20°, что позволяет предположить, что источник наблюдаемых колебаний лежит во внеэкваториальной области внешней магнитосферы. Меньший максимум на низкочастотном краю исследуемого диапазона наблюдается на геомагнитных широтах около 60°, т. е. в окрестности плазмопаузы. Частоты наблюдаемых в этой области колебаний лежат в высокочастотной части диапазона Pc1. Такие пульсации регулярно наблюдаются в этой области геомагнитных широт [Yahnin et al., 2007]. Для отдельных событий колебания наблюдались на широтах выше полярной границы аврорального овала. Практически вся спектральная мощность зарегистрированных колебаний сосредоточена в поперечных компонентах, что соответствует структуре альфвеновской волны.

Для проверки правильности интерпретации, предложенной в работе [Ягова и др., 2023], необходимо прямое сопоставление ионосферных и наземных колебаний, чему и посвящена настоящая работа. Поскольку наибольший интерес представляет область частот выше номинального диапазона Pc1, исследуемый диапазон несколько выше, чем в предыдущем исследовании — от 4 до 12 Гц. Анализируются вариации магнитного поля в ионосфере и на Земле, отобранные по измерениям на двух спутниках SWARM (A и C). Для одновременно зарегистрированных в ионосфере и на Земле вариаций магнитного поля, когерентных на частоте спектрального максимума, отношение амплитуд Земля/ионосфера сравнивается с рассчитанными в модели [Fedorov et al., 2018] значениями.

## 1. ДАННЫЕ И ОБРАБОТКА

Для анализа использованы те же 12 дней в сентябре и декабре 2016 г. со слабой или умеренной геомагнитной возмущенностью, что и в работе [Ягова и др., 2023]. Так же, как и в предыдущем исследовании, отбирались интервалы, для которых спектральная плотность мощности хотя бы для одной компоненты на спутнике SWARM-A и когерентность между спутниками SWARM-A и C для одной из пар компонент превышала заданный порог. Спутники A и C являются близко расположенными — расстояние между ними меняется от 30 до 200 км, а высота орбит составляет ~450 км. Данные измерений магнитного поля доступны с временным разрешением 0.02 с. Для устранения трендов, вызванных прежде всего зависимостью от широты постоянного магнитного поля, использовалась высокочастотная фильтрация с частотой отсечки 1 Гц.

Для компонент магнитного поля был выполнен пересчет из исходной системы координат спутника NEC (North—East—Center) в систему, ориентированную по геомагнитным координатам. Для расчета углов между географическими и исправленными геомагнитными координатами использовался адаптированный код GEOPACK [Papitashvili et al., 1997]. Чтобы отличить обозначения компонент от исходных, для меридиональной и широтной компонент используются обозначения  $B_N$  и  $B_E$  с положительным направлением на север и восток соответственно.

Для анализа наземных пульсаций использовались данные четырех станций сети CARISMA, на которых установлены индукционные магнитометры с частотой оцифровки 100 Гц [Mann et al., 2008]. Координаты станций приведены в табл. 1, а на рис. 1 даны схема расположения станций и проекция орбит спутников для минутного интервала около 19.5 UT 1 декабря 2016 г. (день 336), когда когерентные колебания наблюдались на спутниках, находившихся вблизи

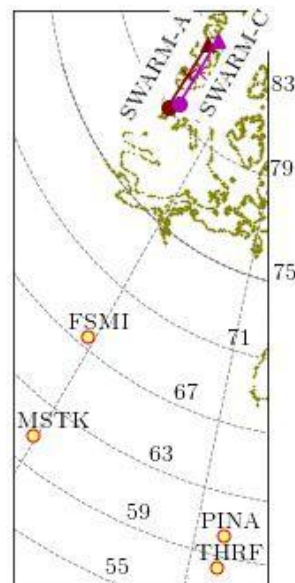


Рис. 1. Схема расположения наземных станций и участок проекции орбит спутников для минутного интервала в предполуденном секторе ( $MLT \approx 9.5$ ) 1 декабря 2016 г. Крестами отмечено время 19:35:40 UT. Серым пунктиром показаны геомагнитные параллели и меридианы

Таблица 1

Станции сети CARISMA

Код станции	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты		Мировое время местной магнитной полуночи	Радиальное расстояние до вершины силовой линии, $L$
	широта	долгота	широта $\Phi$	долгота $\Lambda$		
	град		град		часы	радиус Земли $R_E$
FSMI	60.017	248.05	67.02	308.82	8.02	6.66
MSTK	53.351	247.03	60.39	309.57	7.99	4.16
PINA	50.199	263.96	59.55	333.17	6.59	3.95
THRF	48.027	263.64	57.41	332.88	6.61	3.50

$\Phi=80^\circ$  и на четырех станциях на Земле (событие d4 на рис. 9).

Спектральный анализ выполнялся в той же технике, что и в работе [Ягова и др., 2023]: для вычисления кросс-спектров использовался метод Блэкума—Тьюки для интервала длительностью  $t_s=2.56$  с [Дженкинс, Ватс, 1972]. На первом шаге отбирались события, с надпороговым значением спектральной плотности мощности  $PSD$  (power spectral density,) и спектральной когерентности  $\gamma^2$  на частоте спектрального максимума для хотя бы одной пары горизонтальных компонент на двух спутниках. Пороговые значения были выбраны на уровне  $PSD_b=3 \cdot 10^{-5}$  нТл<sup>2</sup>/Гц и  $\gamma_b^2=0.36$ ; рассматривались только те интервалы, для которых разность геомагнитных широт спутников  $|\Delta\Phi|>0.2^\circ$ . Вариации магнитного поля для отобранных таким образом интервалов можно интерпретировать как колебания, частоты которых при регистрации неподвижным сенсором будут иметь тот же порядок величины, что и частоты на спутнике.

На втором шаге для этих интервалов исследовались вариации магнитного поля на Земле. Выбирались интервалы, во время которых наблюдались когерентные колебания, а расстояние от наземной станции до проекции спутника  $\rho$  не превышало 3000 км. Для отобранных колебаний анализировалось отношение  $PSD$  Земля/ионосфера  $R_{GI}^2$ , по которому определялось и сравнивалось с результатами расчета по модели отношение амплитуд  $R_{GI}$ . Для случаев, когда когерентный сигнал наблюдался на двух или более станциях, исследовалась зависимость  $R_{GI}(\rho)$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. Пространственное распределение когерентных колебаний

Наземные станции занимают полосу магнитных широт от  $57^\circ$  до  $67^\circ$ , а наложенное ограничение на расстояние между станцией и геомагнитной проекцией спутника соответствует широтам от  $30^\circ$  до полюса. На рис. 2 представлено пространственное распределение частоты появления когерентных пульсаций  $C_{GI}$ . Значение определялось для ячейки исправленных геомагнитных (CGM) координат  $\Phi$ - $\Lambda$  как отношение суммарной длительности интервалов с надпороговой когерентностью Земля–спутник по хотя бы одной паре горизонтальных компонент к полной длительности интервалов, для которых вы-

полнялся спектральный анализ. Из рисунка видно, что когерентные колебания локализованы в основном в области геомагнитных широт  $\Phi>60^\circ$ . Появление когерентных на двух спутниках колебаний герцового диапазона преимущественно на высоких геомагнитных широтах отмечалось ранее в работе [Ягова и др., 2023]. Показанные на рисунке распределения в главном схожи для станций FSMI и MSTK (авроральная и субавроральная). Для обеих станций максимальные значения  $C_{GI}$  составляют примерно 0.25, главный максимум наблюдается при  $\Phi>72^\circ$ , а на широтах ниже  $50^\circ$  колебания практически полностью пропадают. На обеих станциях можно отметить максимум вблизи станции и систему максимумов и минимумов с пространственным квазипериодом  $\sim 1000$  км. Но существуют и различия в распределениях для этих станций. Так, на более низкоширотной станции MSTK экваториальная граница распределения смещена к более низким широтам. Из двух высокоширотных максимумов (вблизи меридиана станции с центром на  $\Phi\approx 76^\circ$  и приполюсного) для MSTK доминирует первый, а для FSMI — второй.

### 2.2. Амплитудное и частотное распределения

Рассмотрим отношения амплитуд Земля/спутник. На рис. 3 показаны эмпирические плотности вероятности  $PDF$  (probability density function) отношения  $R_{GI}$  амплитуды колебаний на Земле к амплитуде в ионосфере для отобранных когерентных колебаний. Полное число интервалов для одной пары компонент составляет от 400 до 1000. Значения  $R_{GI}$  меняются от  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$ , а наиболее вероятные значения отличаются для двух станций и для компонент на Земле. Для авроральной станции FSMI медиана распределения  $R_{GI}$  для широтной компоненты на Земле и обеих компонент в ионосфере составляет  $(3\div 5) \cdot 10^{-3}$ , а для меридиональной —  $(5\div 8) \cdot 10^{-2}$ , т. е. примерно на порядок выше. На субавроральной станции MSTK максимум распределения по  $R_{GI}$  для обеих компонент лежит в интервале  $(1\div 2) \cdot 10^{-2}$ , но для широтной компоненты распределение обогащено малыми значениями  $R_{GI}$ . На станциях PINA и THRF (не показаны на рисунке) контраст между компонентами пропадает и наиболее вероятные значения  $R_{GI}$  меняются в интервале  $(2\div 5) \cdot 10^{-2}$ . Наибольший вклад в рассмотренные распределения вносят колебания, зарегистрированные в ионосфере на геомагнитных широтах выше  $72^\circ$  и расстояниях между проекцией спутника и станцией от 1500 до 3000 км.

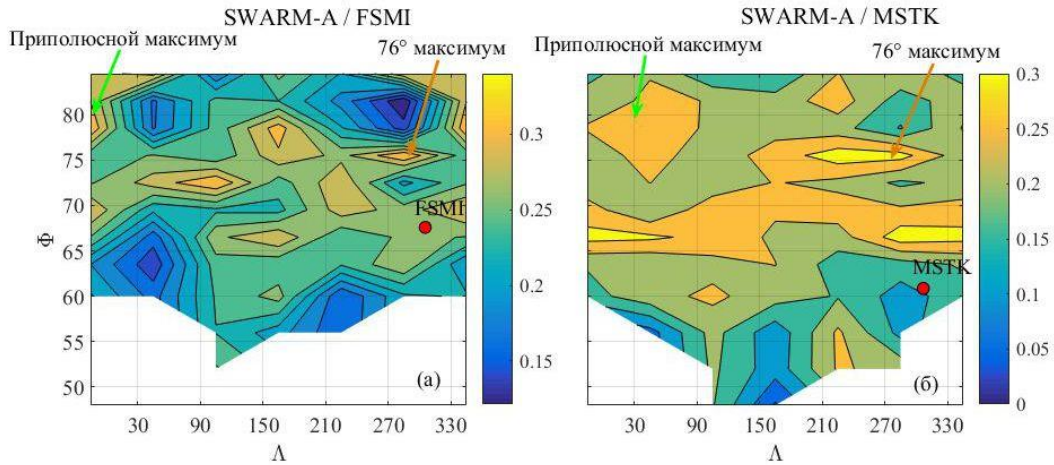


Рис. 2. Отношение  $C_{GI}$ , определенное для ячейки  $\Phi$ - $\Lambda$  для двух пар спутник — станция как отношение суммарной длительности интервалов с когерентными в ионосфере и на Земле колебаниями к суммарной длительности интервалов, для которых выполнялось спектральное оценивание. Положение максимумов  $C_{GI}$  вблизи  $\Phi = 76^\circ$  и приполюсного показаны стрелками

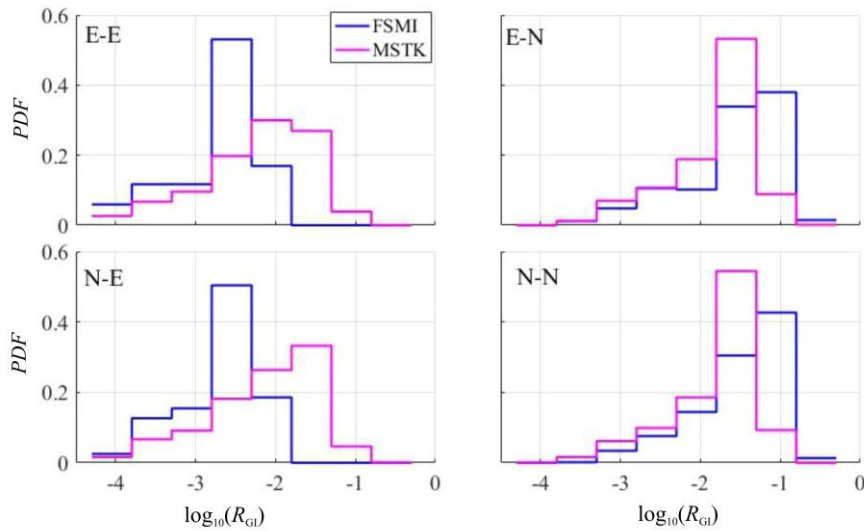


Рис. 3. Эмпирические функции распределения  $PDF$  для отношения амплитуд земля/ионосфера  $R_{GI}$  для тех же двух станций, что и на рис. 2. Обозначение пары компонент: E-N:  $B_E$  (ионосфера),  $B_N$  (Земля)

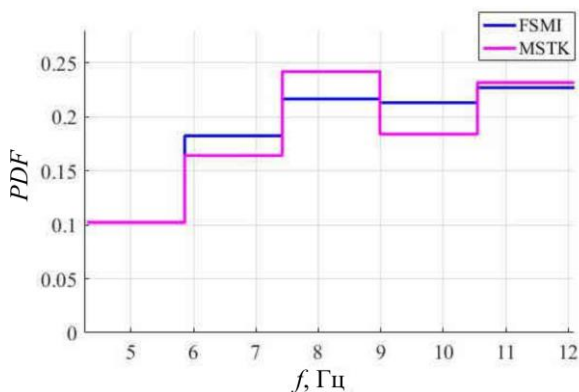


Рис. 4. Распределение когерентных колебаний по частотам спектральных максимумов компоненты  $B_N$  в ионосфере

На рис. 4 представлены распределения по частотам спектральных максимумов для станций FSMI и MSTK. Спектральные максимумы когерентных колебаний наблюдаются во всем исследуемом диапазоне ча-

стот, с преобладанием частот выше 6 Гц и максимумами распределения вблизи 8 и 11 Гц. Далее мы рассмотрим, как значения отношения амплитуд пульсаций Земля/спутник, определенные из измерений, соотносятся с модельными оценками в зависимости от радиуса пучка.

### 3. СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННОГО ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ И РАСЧЕТНОГО ОТНОШЕНИЯ $R_{GI}$

Для анализа пространственной структуры поля волны на Земле и в ионосфере использовалась модель прохождения альфвеновского пучка через квазиреальную ионосферу [Fedorov et al., 2018]. Эта модель позволяет рассчитать пространственные распределения магнитного и электрического полей в ионосфере и на Земле для падающего на ионосферу альфвеновского пучка конечного радиуса. Падающая волна имеет структуру пучка с ненулевой ради-

альной компонентой электрического поля и азимутальной магнитного, для которых зависимость от радиального расстояния  $\rho$  от центра пучка имеет вид  $B_\phi \sim \rho/\rho_0 \exp(-(\rho/\rho_0)^2 + 1)$ .

Вертикальный профиль ионосферных параметров определялся по модели IRI-2007 [Bilitza, Reinisch, 2008], дополненной моделью MSIS для нейтральной атмосферы [Hedin et al., 1977; Emmert et al., 2020]. В герцовом диапазоне частот спектральные и пространственные распределения магнитного поля в ионосфере определяются наличием альфвеновского резонанса (IAR) и волноводов для быстрых магнитозвуковых (БМЗ) волн. Два основных пространственных масштаба задаются профилем альфвеновской скорости и радиусом пучка.

Чтобы получить зависимость амплитуды поля от радиального расстояния  $B(\rho)$ , проводится суммирование по пространственным гармоникам. На форму спектра влияет частота колебаний, радиус пучка и профиль комплексной диэлектрической проницаемости в ионосфере, который в основном определяется уровнем солнечной радиации. Таким образом, из входных параметров модели IRI на пространственное распределение магнитного поля в ионосфере и на Земле влияют сезон, местное солнечное время LT и географическая широта. Из-за прецессии орбиты спутников колебания регистрировались в сентябре в вечернем (18 LT) и утреннем (6 LT) секторах, а в декабре — в предполуденном (10–11 LT) и предполночном (22–23 LT) секторах.

Зависимость амплитуды компонент магнитного поля от радиального расстояния от оси пучка в ионосфере на высоте орбиты SWARM и на Земле показана на рис. 5 для периода вблизи равноденствия в утреннем секторе. Географическая широта центра пучка составляет  $70^\circ$ , рассматриваются частоты 8 и 11 Гц при двух значениях радиуса пучка. В ионосфере для пучка радиусом  $\rho_0=200$  км амплитуды обеих горизонтальных компонент близки на малых расстояниях от оси пучка, а при  $\rho>2000$  км отличаются не более чем на порядок с преобладанием радиальной компоненты на 11 Гц и азимутальной — на 8 Гц. Максимум амплитуды наблюдается на расстоянии около  $\rho_0$  от оси (точное значение зависит от радиуса пучка и частоты). Для исследуемой задачи существенно, что на расстоянии радиуса от максимума амплитуда меняется примерно на порядок.

Падающий альфвеновский пучок может возбуждать волны как в ионосферном, так и в атмосферном волноводах. Из-за интерференции этих мод зависимость амплитуды от расстояния  $B(\rho)$  имеет немонотонный вид. Функцию  $B(\rho)$  на Земле и в ионосфере можно представить как сумму медленно меняющейся функции  $V_0(\rho)$  и осциллирующей  $b(\rho)$ , которая из-за интерференции не является строго периодичной, поэтому можно говорить только о среднем пространственном периоде.  $V_0(\rho)$  быстро спадает на расстояниях до нескольких радиусов пучка, а потом спад резко замедляется. На больших расстояниях значения  $V_0(\rho)$  больше для пучка большего радиуса. Для обоих значений частоты колебаний и радиуса пучка на больших расстояниях от оси на Земле доминирует радиальная компонента, а значения ам-

плитуды для азимутальной компоненты на 1–2 порядка меньше.

С ростом радиуса пучка средний пространственный период  $\langle\lambda^*\rangle$  осциллирующей функции  $b(\rho)$  растет и в ионосфере, и на Земле. В результате колебания становятся более плавными, а в ионосфере уменьшается и относительная амплитуда вариаций (рис. 5, а). Сглаживание пространственных вариаций происходит как при прохождении ионосферы, в результате чего зависимость на Земле  $B(\rho)$  становится более плавной (см. рис. 5, а, б), чем в ионосфере, так и при увеличении частоты (рис. 5, а–в и б–з).

Количественные различия между распределениями при разной освещенности ионосферы сводятся к изменениям амплитуды и пространственного периода  $\langle\lambda^*\rangle$  функции  $b(\rho)$  в ионосфере и на Земле. На рис. 6 показаны зависимости  $\langle\lambda^*\rangle$  радиальной компоненты  $b_r(\rho)$  от радиуса пучка  $\rho_0$  на Земле для частоты 6 Гц и географической широты  $70^\circ$ . Как вблизи равноденствия, так и вблизи солнцестояния  $\langle\lambda^*\rangle$  составляет около 500 км при  $\rho_0=100$  км и возрастает примерно вдвое при увеличении радиуса пучка от 100 до 400 км, но характер роста зависит от освещенности в ионосфере. При самой низкой освещенности (ночные часы, декабрь) рост при малых радиусах пучка медленный, с ростом освещенности происходит более быстрый рост на начальном участке, а при  $\rho_0>300$  км зависимость выходит на насыщение.

Чтобы понять, насколько полученные из наблюдений значения отношения амплитуд Земля/ионосфера соответствуют модельным, рассмотрим зависимость  $R_{GI}$  от радиального расстояния на частоте 8 Гц для всех исследованных комбинаций местного времени и сезона при разных значениях радиуса пучка. Поскольку на высоте спутника на малых расстояниях от оси амплитуды близки для двух компонент,  $R_{GI}$  вычислялось как отношение амплитуд одной из компонент на Земле и меридиональной компоненты в ионосфере. В определении отношения  $R_{GI}$  существует неопределенность, так как точное расстояние от центра пучка в ионосфере до спутника не известно. Engebretson et al. [2008] для Pc1 пульсаций в ионосфере показали, что максимальные значения размаха этих колебаний превышают 10 нТл. Аналогичные значения получены и в работе [Ягова и др., 2023] для колебаний магнитного поля диапазона 2.5–10 Гц, а наиболее вероятные значения размаха колебаний в ионосфере, для которых наблюдается сигнал на Земле, составляют  $\sim 1$  нТл. Учитывая, что в ионосфере спад амплитуды на порядок происходит на расстоянии примерно радиуса пучка от положения максимума амплитуды, который наблюдается при  $\rho \approx \rho_0$ , будем вычислять отношение  $R_{GI}$  при  $\rho = 2\rho_0$ .

Результаты представлены на рис. 7 для сентября (слева) и декабря (справа). Наибольшие значения  $R_{GI}$  соответствуют ночным условиям вблизи зимнего солнцестояния (рис. 7, в). Для компоненты  $B_r$  и  $\rho_0=500$  км  $R_{GI}>0.1$  при  $\rho<2000$  км, а на больших расстояниях  $R_{GI}$  не опускается ниже  $5 \cdot 10^{-2}$ . При  $\rho_0=200$  км значения  $R_{GI}$  в несколько раз меньше, чем для  $\rho_0=500$  км, но и в этом случае значения  $R_{GI}$  остаются выше  $10^{-2}$  везде, кроме окрестностей минимумов. Для азимутальной компоненты  $R_{GI}$  почти на два порядка меньше, чем для радиальной. Качест-

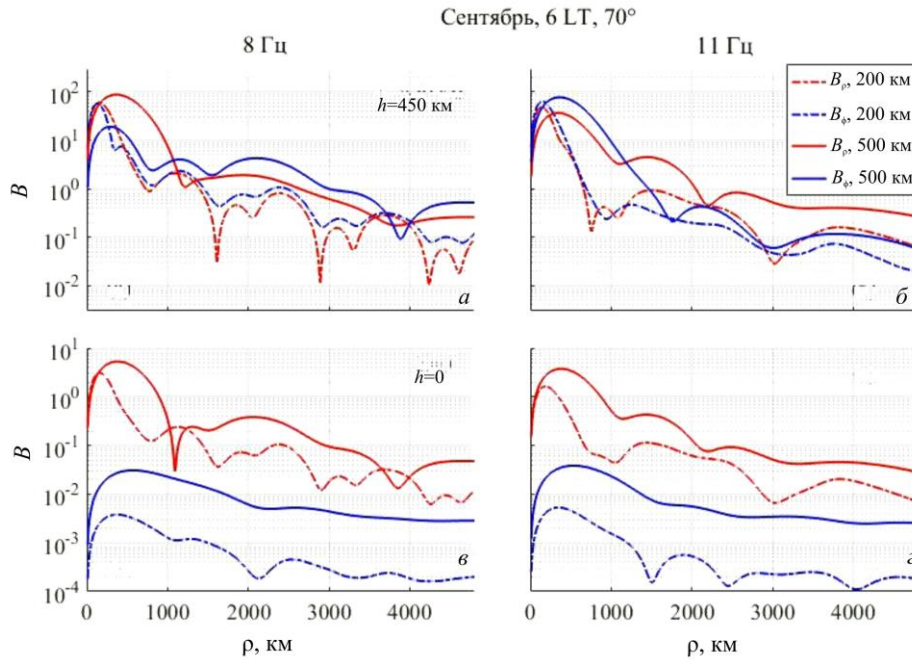


Рис. 5. Расчетная зависимость от радиального расстояния амплитуды горизонтальных компонент магнитного поля в ионосфере (верхние панели) и на Земле (нижние панели) для падающего альфвеновского пучка с частотой 8 Гц (а, б) и 11 Гц (в, д) в утреннем секторе вблизи равноденствия. Значения географической широты центра пучка приведены в заголовке, а радиуса — в легенде

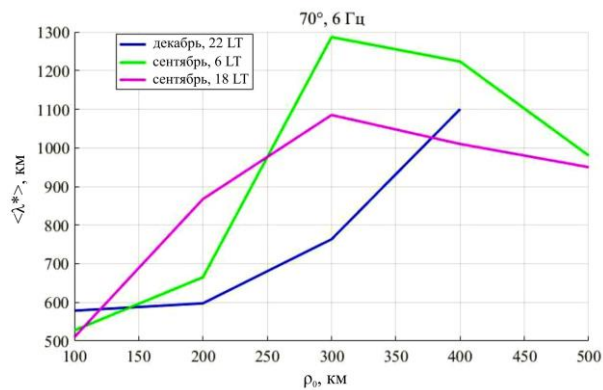


Рис. 6. Зависимость среднего пространственного периода  $\langle \lambda^* \rangle$  радиальной компоненты  $b_\rho(\rho)$  функции  $b(\rho)$ , определенного по области  $\rho > 2\rho_0$  на Земле, от радиуса пучка для частоты 6 Гц и географической широты  $70^\circ$

венно сходная картина наблюдается вблизи равноденствия как для утренних (рис. 7, а), так и для вечерних (рис. 7, б) условий, но значения  $R_{GI}$  для доминирующей меридиональной компоненты становятся меньше с ростом электронной концентрации. В сентябре в утреннем секторе при  $\rho = 2000$  км  $R_{GI} = 5 \cdot 10^{-2}$ , а на больших расстояниях значения снижаются до  $10^{-3}$ . В вечернем секторе значения  $R_{GI}$  примерно на порядок меньше, чем в утреннем. Общим для всех этих случаев являются большие значения для большего радиуса пучка и доминирование на больших расстояниях от оси пучка радиальной компоненты  $B_\rho$ . На Земле можно пренебречь азимутальной компонентой  $B_\phi$ , так как ее амплитуда на 1–2 порядка меньше  $B_\rho$ .

Качественные отличия от рассмотренных случаев наблюдаются в дневном секторе в декабре (рис. 7, в).

Если для  $\rho_0 = 200$  км доминирует, как и в предыдущих случаях, радиальная компонента  $B_\rho$ , то при  $\rho_0 \geq 500$  км на больших расстояниях начинает доминировать  $B_\phi$ , а в радиальной компоненте возникает обратная зависимость  $R_{GI}$  от радиуса пучка: значения  $R_{GI}$  для  $\rho_0 \geq 500$  км становятся ниже, чем для  $\rho_0 \leq 300$  км. Эффект усиливается с ростом радиуса пучка, и на больших расстояниях от оси пучка значения  $R_{GI}$  для  $B_\rho$  узкого пучка и  $B_\phi$  широкого становятся сравнимыми. Чтобы проиллюстрировать этот эффект, на рис. 7, д для дневных условий в декабре показана зависимость  $R_{GI}(\rho)$  для  $\rho_0 = 700$  км. Значения  $R_{GI}$  падают до  $10^{-2}$  на расстояниях до  $3\rho_0$ , а при  $\rho > 2000$  км «выживают» радиальная компонента узкого пучка и азимутальная — широкого, для которых значения  $R_{GI} \approx 10^{-3}$ .

Таким образом, для всех рассмотренных сочетаний сезона и местного времени на расстояниях от 1000 до 3000 км от оси пучка максимальные значения  $R_{GI}$  для доминирующей компоненты лежат в интервале от  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-1}$ . Анализ когерентных в ионосфере и на Земле колебаний показывает, что для большинства интервалов определенные из измерений значения  $R_{GI}$  лежат в том же диапазоне (см. рис. 3).

Выберем интервалы, когда когерентные пульсации регистрируются одновременно в ионосфере и на нескольких станциях на Земле. Для каждого из таких событий радиус пучка остается постоянным и можно проанализировать зависимость амплитуды от радиального расстояния. Наибольшее количество таких пульсаций наблюдалось в декабре: в ночном секторе в окрестности 8 Гц ( $8 \pm 0.6$  Гц) и в дневном при  $f \approx 8$  и 11 Гц. Результаты для ночного сектора представлены на рис. 8. Так как на Земле модель предсказывает доминирование радиальной относительно оси пучка

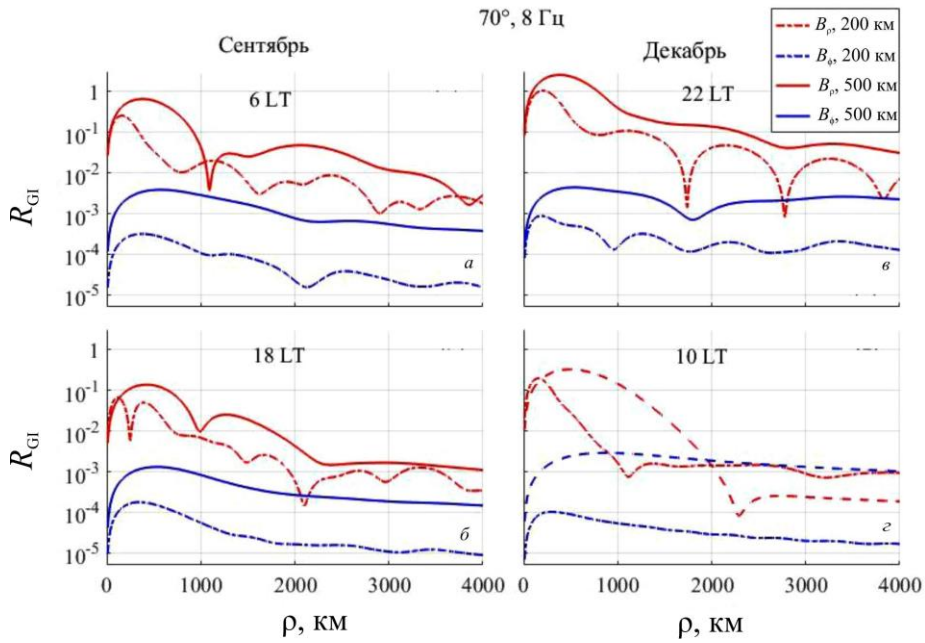


Рис. 7. Расчетная зависимость от радиального расстояния отношения  $R_{GI}$  для частоты 8 Гц вблизи равноденствия (а, б) и солнцестояния (в, г)

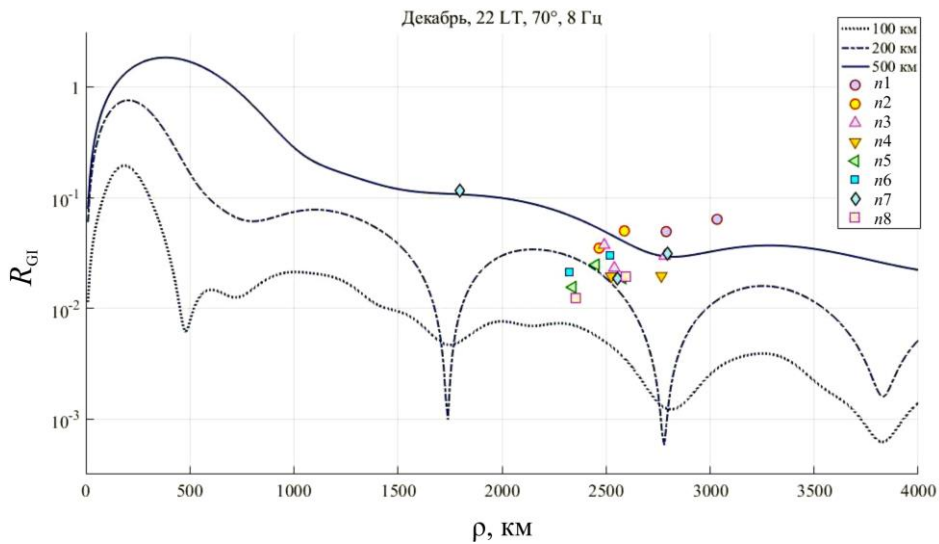


Рис. 8. Сравнение расчетных и определенных из измерений значений отношения  $R_{GI}$  для ночных условий в декабре

Таблица 2

Параметры основных максимумов вероятности появления когерентных в ионосфере и на Земле колебаний, показанных на рис. 2

Станция (рисунок)	Максимум	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты		$\mu = \cos(\psi_{\max})$
		широта	долгота	широта, $\Phi$	долгота, $\Lambda$	
FSMI (2, а)	76°	70°	243°	76°	295°	0.78
	приполюсной	74°	289°	81°	5°	0.92
MSTK (2, б)	76°	78°	195°	76°	240°	0.89
	приполюсной	74°	305°	79°	40°	0.93

компоненты, предполагаем, что она полностью определяет амплитуду на Земле. Для ионосферных областей, где вероятность появления когерентных колебаний максимальна (отмеченные стрелками на рис. 2 максимумы вблизи  $\Phi=76^\circ$  и полюса), ра-

диальная компонента в системе, связанной с пучком, достаточно точно совпадает с меридиональной на Земле. В табл. 2 представлены значения  $\mu = \cos(\psi)$ , где  $\psi$  — угол между магнитным меридианом и направлением на центр пучка, а  $\psi_{\max}$  соответ-

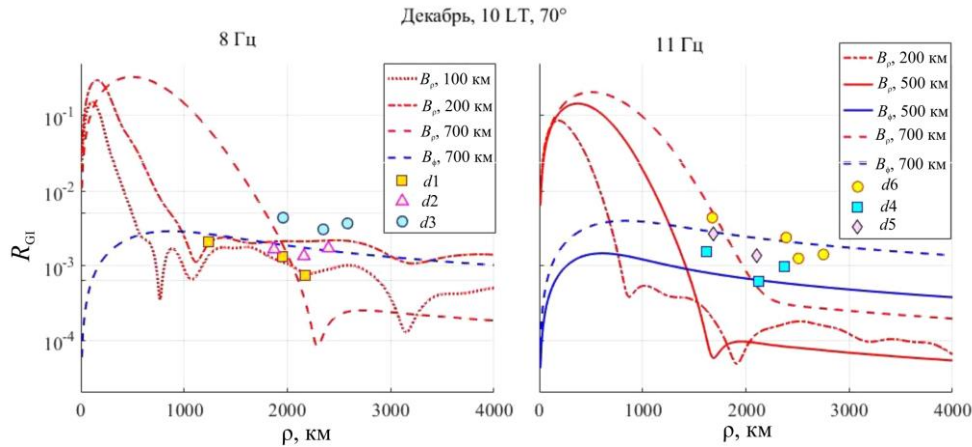


Рис. 9. Сравнение расчетных и определенных из измерений значений отношения  $R_{GI}$  для дневных условий в декабре 8 Гц (слева) и 11 Гц (справа)

вует расположению спутника, когда ось пучка сдвинута на  $2\rho_0$  по долготе от меридиана станции. Даже в этом случае  $\mu$  близко к 1.

Географические широты спутников лежали в интервале от  $69^\circ$  до  $72.5^\circ$ , для расчета использовалась широта  $70^\circ$ . Расчетные зависимости  $R_{GI}(\rho)$  для  $B_p$  при трех значениях радиуса пучка показаны кривыми, а маркерами — значения, полученные из наблюдений. Расстояния между проекцией спутника и станцией лежат в интервале от 1700 до 3000 км, а значения  $R_{GI}$  — от  $10^{-2}$  до  $10^{-1}$ . Для большей части событий значения  $R_{GI}$  соответствуют расчетным в рассмотренном интервале радиусов пучка.

Результаты для дневных условий показаны на рис. 9. Для представленных на левой панели событий частоты соответствуют интервалу от 7.4 до 9 Гц, а географические широты спутника — от  $69^\circ$  до  $71^\circ$ . Расстояния находятся в интервале от 1200 до 2700 км, а значения  $R_{GI}$  — от  $6 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$ , что примерно соответствует расчетным значениям для доминирующей компоненты. Для дневных условий вблизи зимнего солнцестояния близкие расчетные значения могут соответствовать как азимутальной компоненте для широкого пучка, так и радиальной — для узкого. Так, значения  $R_{GI}$  в событии d1 лучше соответствуют  $B_p$  при  $100 < \rho_0 < 200$  км, а для события d2 обе интерпретации практически равноправны. В то же время событие d3 лучше соответствует широкому пучку ( $\rho_0 \geq 700$  км), для которого на малых расстояниях доминирует радиальная, а при больших — азимутальная компонента.

На правой панели рис. 9 приведены результаты для  $f=11$  Гц. Частоты колебаний находятся в интервале от 10.9 до 12.1 Гц, а географические широты спутника — от  $68^\circ$  до  $72.6^\circ$ . Расстояния между станциями и проекцией спутника лежат в интервале от 1600 до 2800 км, а значения  $R_{GI}$  — от  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$ . Таким образом, диапазоны значений  $R_{GI}$  для 8 и 11 Гц совпадают, но для 11 Гц эти значения согласуются с расчетными только для широкого пучка.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Отношение  $R_{GI}$  Земля/ионосфера амплитуды колебаний компонент магнитного поля на частотах

выше номинального Pc1-диапазона соответствует падающему на ионосферу альфвеновскому пучку с радиусом несколько сотен километров. Поскольку максимум появления таких колебаний в ионосфере лежит на широтах, более высоких, чем у наземных станций, а расстояние вдоль меридиана между зоной максимума и наземными станциями превышает 1000 км, то радиальной компоненте  $B_p$  примерно соответствует меридиональная компонента на Земле. Следует отметить, что при разнице амплитуд компонент на порядок и больше, возникающей в модели на больших расстояниях от оси пучка, азимутальной компонентой можно полностью пренебречь и поведение обеих компонент на Земле определяется радиальной компонентой. Дополнительная ошибка, связанная с различием между направлением на центр пучка и ориентацией соответствующей компоненты на Земле, меньше ошибки, возникающей из-за неопределенности локализации пучка по спутниковым данным. Таким образом, сравнение расчетных и полученных из измерений значений  $R_{GI}$  имеет смысл для оценки порядка величины. Возможности диагностики улучшаются для отдельных событий, когда когерентные колебания регистрируются одновременно в ионосфере и в нескольких точках на Земле, а большая разница широт между спутником и наземной станцией уменьшает влияние ошибки, связанной с неточной локализацией центра пучка. Свидетельством в пользу того, что модель в целом правильно описывает зарегистрированные в ионосфере и на Земле колебания, является не только совпадение расчетного и восстановленного из данных измерений диапазонов значений  $R_{GI}$ , но и одинаковая зависимость от местного времени. Так же как и в модельных расчетах, определенные из измерений значения  $R_{GI}$  в ночные часы примерно на порядок выше, чем в дневные.

Модель предсказывает доминирование на Земле радиальной компоненты и большие значения отношения  $R_{GI}$  для больших радиусов пучка. Такой вид зависимости возникает для всех рассмотренных ионосферных условий, кроме дневных часов вблизи зимнего солнцестояния. Для этих условий появляется качественное отличие узкого пучка от широкого.



Для узкого на больших расстояниях доминирует радиальная компонента, как и при других условиях в ионосфере, для широкого на малых расстояниях от оси пучка доминирует радиальная компонента, на больших — азимутальная. Кроме того, на больших расстояниях от оси пучка близкие значения  $R_{GI} \sim 10^{-3}$  возникают в радиальной компоненте для узкого пучка и в азимутальной — для широкого, что делает интерпретацию данных измерений неоднозначной. Частично эта неоднозначность связана с ограниченностью доступных данных и в принципе может быть устранена при увеличении числа спутников и наземных станций и включении в анализ распределения не только амплитуды, но и фазы. Но существуют и ограничения самой модели. Использование IRI в области высоких широт ограничено интервалами низкой авроральной активности, когда вклад высыпаний в ионосферную проводимость на высотах E-слоя невелик. Этому условию в основном соответствуют отобранные события, но корректный учет высыпаний может изменить значения полученных амплитуд и отношения  $R_{GI}$ .

Кроме того, в используемой модели не учитываются вариации параметров ионосферы между пучком и ионосферной проекцией наземной станции и внутри пучка для широких пучков. Вблизи границ аврорального овала и терминатора становится существенной горизонтальная неоднородность ионосферы, учет которой потребует существенного изменения модели. Косвенным подтверждением этого являются выявленные особенности распределения амплитуды волны в дневные часы вблизи зимнего солнцестояния. Поскольку зимой на высоких широтах освещенная область составляет узкую полосу вблизи полудня, для широкого пучка ошибка, связанная с приближением горизонтально однородной ионосферы, может существенно повлиять на результаты.

Поскольку профиль комплексной диэлектрической проницаемости в ионосфере зависит от частоты волны [Fedorov et al., 2018], граница между узким и широким пучками, на которой происходит изменение доминирующей на больших расстояниях компоненты, зависит не только от параметров ионосферы, но и от частоты. Так, при  $f=11$  Гц пучок ведет себя как широкий уже при  $\rho_0=300$  км, а при  $f=6$  Гц  $B_p$  остается доминирующей компонентой и при  $\rho_0=500$  км. Источником расхождений между модельными и восстановленными из измерений значениями  $R_{GI}$  может быть различие спектров колебаний. В модели рассматривается одна частота, а реальный сигнал представляет собой короткий волновой пакет с широкополосным спектром. Учет конечной ширины спектра может привести к заметным изменениям, если частотная зависимость достаточно сильная, как например, в дневные часы вблизи зимнего солнцестояния.

## ВЫВОДЫ

1. Наличие когерентных в ионосфере и на Земле колебаний магнитного поля на частотах 4–12 Гц подтверждает, что обнаруженные по спутниковым наблюдениям [Ягова и др., 2023] вариации магнитного поля на частотах выше номинального Pc1-диапазона

являются колебаниями, частоты которых мало отличаются при регистрации на низколетящем спутнике и на Земле.

2. В ионосфере максимальная вероятность появления приходится на высокие геомагнитные широты, соответствующие областям полярного каспа-клефта и полярной границе аврорального овала.

3. Пространственный масштаб колебаний в ионосфере составляет сотни километров, что подтверждается сравнением значений отношения амплитуд Земля/ионосфера  $R_{GI}$ , восстановленных из измерений и рассчитанных в модели [Fedorov et al., 2018] прохождения альфвеновского пучка конечного радиуса через квазиреальную ионосферу.

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.eo.esa.int/>], а данные измерений сети CARISMA — на сайте [<https://www.carisma.ca/about-carisma>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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 года: Особенности амплитудных и поляризационных спектров и связь с ионно-циклотронными волнами в магнитосфере. *Известия вузов. Радиофизика*. 2015. Т. 58, № 8. С. 607–621.
- Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альфвеновский резонатор. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1981. Т. 21, № 5. С. 610–614.
- Ягова Н.В., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А. и др. 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).
- 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).
- 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.
- 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).
- Emmert J.T., Drob D.P., Picone J.M., et al. NRLMSIS 2.0: A whole-atmosphere empirical model of temperature and neutral species densities. *Earth and Space Science*. 2020. Vol. 8. e2020EA001321. DOI: [10.1029/2020EA001321](https://doi.org/10.1029/2020EA001321).
- 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).
- Hedin A.E., Reber C.A., Newton G.P., et al. A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS. 2. Composition. *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82. P. 2148–2156. DOI: [10.1029/JA082i016p02148](https://doi.org/10.1029/JA082i016p02148).

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. A08203. DOI: [10.1029/2011JA016574](https://doi.org/10.1029/2011JA016574).

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

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).

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. P. 1303–1354. DOI: [10.5194/angeo-19-1303-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-1303-2001).

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).

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).

URL: <https://swarm-diss.esa.int/> (дата обращения 11 января 2023 г.).

URL: <https://www.carisma.ca/about-carisma> (дата обращения 11 января 2023 г.).

*Статья подготовлена по материалам Восемнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 6–10 февраля 2023 г., ИКИ РАН, Москва.*

*Как цитировать эту статью:*

Ягова Н.В., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., Мазур Н.Г. Естественные электромагнитные колебания диапазона 4–12 Гц по наблюдениям на спутниках SWARM и сети магнитометров CARISMA. *Солнечно-земная физика.* 2023. Т. 9, № 3. С. 128–137. DOI: [10.12737/szf-93202314](https://doi.org/10.12737/szf-93202314).