

НЕРЕЗОНАНСНЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

А.В. Костров, М.Е. Гушин, С.В. Коробков, А.В. Стриковский

NON-RESONANT PARAMETRIC PROCESSES IN SPACE PLASMA

A.V. Kostrov, M.E. Guschin, S.V. Korobkov, A.V. Strikovskiy

В рамках модели нерезонансного параметрического преобразования амплитуды и частоты обсуждаются процессы генерации естественных излучений в планетарных магнитосферах. Показано, что модуляция электромагнитных волн, возбуждаемых в магнитоактивной космической плазме, может быть обусловлена нестационарными возмущениями магнитного поля, существующими на трассе распространения сигналов. Параметрические эффекты отвечают за частотную модуляцию излучения; дисперсия групповой скорости может приводить к глубокой амплитудной модуляции сигнала и формированию всплесковой структуры динамического спектра. С учетом нерезонансных параметрических эффектов объясняются особенности формирования сигналов, регистрируемых в космической плазме в свистовом, ионно-циклотронном, верхнегибридном диапазонах.

The generation of natural emissions in magnetospheres of planets is discussed with the application of the theory of non-resonant transformation of frequency and amplitude. It is shown that the modulation of electromagnetic waves in magnetized space plasma can be conditioned by the time-varying magnetic field disturbances existing on the wave propagation path. The frequency modulation is due to parametric effects; group velocity dispersion can result in a strong signal modulation and subsequent formation of the burst-like structure of the spectrum. The non-resonant parametric effects can be used for explanation of peculiarities of natural emissions recorded in space plasma in whistler, ion-cyclotron and upper-hybrid frequency bands.

Введение

Электромагнитные волны, возбуждаемые естественными и искусственными источниками и распространяющиеся в космическом пространстве, играют важную роль в динамике космической плазмы, в значительной мере определяют энергетический баланс и являются ценнейшим источником информации о параметрах плазмы и существующих в ней возмущениях. Системы для их регистрации размещаются не только на наземных станциях, но и на научных спутниках, значительная часть которых находится в пределах магнитосферы Земли. Успехи в освоении космоса, начавшемся 50 лет назад с запуска первого спутника Земли, к настоящему времени превратили околоземное пространство в гигантскую «лабораторию», позволяющую исследовать разнообразные плазменно-волновые процессы.

В космосе плазма, как правило, находится в магнитном поле; значительное внимание привлекают к себе физические процессы в магнитосферах планет Солнечной системы: Земли, Юпитера, Сатурна и других. Благодаря наличию магнитного поля дисперсия электромагнитных волн, возбуждаемых в плазме, достаточно сложна; спектр сигналов характеризуется резонансами (плазменными, электронными, циклотронными, ионными, гибридными) и отсечками, ограничивающими области непрозрачности плазмы для волн определенных поляризований. В зависимости от конкретных условий в космической плазме возбуждаются некоторые выделенные типы волн. В частности, в планетарных магнитосферах значительная часть естественных излучений генерируется энергичными электронами в свистовом диапазоне. Энергичные протоны возбуждают ионно-циклотронные волны, регистрируемые в магнитосфере Земли в форме короткопериодных магнитных пульсаций. В спектрах излучения планет большой интерес также представляют высокочастотные волны; примерами сигналов такого типа являются всплески аврорального километрового радиоизлучения (АКР), формирующиеся

в полярных областях земной магнитосферы, а также декаметровое радиоизлучение Юпитера.

Даже относительно узкополосные (или дискретные) естественные излучения редко бывают непрерывными, для них характерна модуляция интенсивности и спектра. Модуляция бывает связана с режимами генерации, однако она может возникать и в процессе распространения сигнала. Космическая плазма не является стационарной средой, она непрерывно возмущается потоками частиц и низкочастотными волнами. В результате амплитудно-частотные характеристики излучения могут существенно искажаться уже после выхода из области источника. При этом определяющую роль начинают играть разнообразные параметрические эффекты. Ниже обсуждаются механизмы преобразования спектра волн и связанная с ними модуляция интенсивности излучений в планетарных магнитосферах.

Традиционно при анализе явлений, приводящих к обогащению спектра волн в плазме, рассматриваются резонансные параметрические процессы [1]. При этом считается, что возмущения параметров плазмы носят периодический (или волновой) характер, причем временные и пространственные масштабы вариаций находятся в определенных соотношениях с частотами и длинами исследуемых волн. С другой стороны, значительный интерес представляет обширный класс параметрических явлений, получивших название «нерезонансных» [2]. В последнем случае на закон изменения параметров среды не накладываются специальные ограничения, он, в частности, может быть аperiodическим. При нерезонансной модуляции параметров среды энергия волн, как правило, не накапливается на фиксированных частотах, напротив, возможно эффективное широкополосное преобразование спектра.

Хотя в плазме в качестве нестационарного параметра обычно рассматривается величина электронной плотности, показатель преломления электромагнитных волн сильно зависит и от величины магнитного поля. Нестационарные возмущения магнит-

ного поля типичны для космической плазмы, они вызываются интенсивными низкочастотными волнами и потоками заряженных частиц. Возмущения магнитного поля, в отличие от вариаций плотности плазмы, обладают сравнительно малой «инерцией», они могут переноситься со сверхзвуковыми скоростями и приводят к специфическим эффектам амплитудно-частотной модуляции излучения без заметных возмущений концентрации заряженных частиц [3].

Нерезонансное параметрическое преобразование частоты излучения в нестационарной магнитоактивной плазме

Описание нерезонансных параметрических явлений в нестационарной среде при произвольном соотношении характерного времени вариаций ее параметров и периода колебаний в волне представляет собой достаточно сложную задачу. Однако если параметры среды являются сравнительно медленными функциями времени и пространственных координат, анализ волн можно произвести в рамках приближения геометрической оптики, обобщенного на случай нестационарных сред [2]. Предлагаемый подход позволяет непосредственно записать уравнения переноса частоты квазимонохроматического излучения в среде с переменными параметрами:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\vec{V}_g \nabla) \omega = -\omega \left(\frac{\partial (n\omega)}{\partial \omega} \right)^{-1} \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\omega, \vec{k}}, \quad (1)$$

где ω – частота излучения, n – показатель преломления среды, \vec{V}_g – вектор групповой скорости волны.

Модуляция показателя преломления должна приводить к частотной модуляции излучения; фактически, частота сигнала «отслеживает» вариации показателя преломления и изменяется с соответствующими характерными временами. Чем дальше волна распространяется в нестационарной среде, тем больше изменяется ее частотный спектр. Максимальные частотные сдвиги наблюдаются, когда время группового запаздывания сигнала L/V_g (L – длина трассы в нестационарной среде) приближается к характерному временному масштабу возмущений $|n/(\partial n/\partial t)|$.

Эффекты нерезонансного преобразования частоты обсуждались в задачах взаимодействия лазерного излучения с плазмой [4] и компрессии СВЧ-импульсов в волноводах с плазменным заполнением [5], но практически не обсуждались применительно к условиям космической плазмы. Однако ясно, что нестационарные вариации параметров плазмы и магнитного поля должны приводить к частотной модуляции волн, особенно тех, которые испытывают сильное замедление в нестационарных плазменных областях.

Нерезонансные параметрические процессы в магнитосферах Земли и Юпитера

а. Амплитудно-частотная модуляция волн свистового диапазона в плазме с нестационарным магнитным полем

Эффекты модуляции волн свистового диапазона в околоземном пространстве, обусловленные нестационарными вариациями параметров магнитосферы, описаны во многих работах. Свистовые излучения

КНЧ-ОНЧ-диапазона с выраженной амплитудно-частотной модуляцией, регистрируемые одновременно с возмущениями магнитного поля соответствующего периода, наблюдаются как в пределах плазмосферы, так и в периферийных областях, в частности, в хвостовой части магнитосферы Земли и в турбулентном слое (рис. 1, [6]). Медленные свистовые волны характеризуются сильно выраженной дисперсией групповой скорости и являются теми волнами, для которых явления нерезонансной параметрической частотной модуляции должны проявляться наиболее ярко. Для волн данного типа при их распространении вдоль направления магнитного поля показатель преломления записывается следующим образом:

$$n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - \omega_H)}, \quad (2)$$

где ω_p – плазменная частота, ω_H – электронная циклотронная частота. При наличии нестационарных вариаций магнитного поля уравнение переноса частоты (1) для таких волн можно переписать в виде:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + V_g \frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{\omega}{\omega_H} \frac{\partial \omega_H}{\partial t} \quad (3)$$

Групповая скорость волн свистового диапазона зависит от плотности плазмы, частоты излучения и величины магнитного поля:

$$V_g = 2c \frac{\omega^{1/2} (\omega_H - \omega)^{3/2}}{\omega_p \omega_H}, \quad (4)$$

где c – скорость света в вакууме.

Проведение плазменных исследований в космосе сопряжено с постановкой технически сложных и дорогостоящих экспериментов. Это обстоятельство оправдывает изучение космических явлений в модельных экспериментах, проводимых на лабораторных установках. При правильном подборе параметров основные процессы как в космической, так и в лабораторной плазме подчиняются общим закономерностям. Кроме того, в лаборатории можно использовать весь арсенал современной диагностики плазмы, многократно воспроизводя исследуемое явление и целенаправленно варьируя условия его протекания. На рис. 2 представлены результаты, полученные в модельных экспериментах, выполненных на стенде «Крот» (ИПФ РАН). Показаны динамические спектры пробных свистовых волн, прошедших через область с периодической модуляцией магнитного поля на уровне $\Delta B/B_0 \sim 3\%$. Видно, что частота и амплитуда волны модулируются с периодом, соответствующим

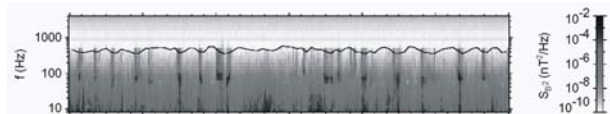


Рис. 1. Динамический спектр всплесков излучения свистового диапазона («львиных рыков»), регистрируемых на борту спутника Cluster в области турбулентного слоя магнитосферы Земли одновременно с вариациями магнитного поля; зависимость циклотронной частоты от времени показана сплошной кривой.

периоду модуляции магнитного поля, при этом величина относительных частотных сдвигов $\Delta\omega/\omega_0 \sim \Delta B/B_0$, что легко объясняется на базе уравнения (3). Благодаря сильной дисперсии групповой скорости (см. (4)) наблюдается эффект компрессии частотно-модулированной волны: элементы с высокими частотами «отстают» от низкочастотных элементов, изначально непрерывный сигнал испытывает глубокую (до нуля) амплитудную модуляцию и дробится на отдельные сжимающиеся волновые пакеты. Похожие всплески свистовых излучений, коррелирующие с интенсивными вариациями магнитного поля амплитудой до $\Delta B/B_0 \sim 30\text{--}100\%$, регистрируются, в частности, на спутниках, пролетающих в зоне нейтрального и турбулентного слоев магнитосферы Земли. Особенно важно, что благодаря сочетанию параметрических эффектов и сильной дисперсии свистовых волн глубокая амплитудная модуляция излучения может вызываться даже относительно небольшими – на уровне нескольких процентов – возмущениями магнитного поля.

б. Роль нерезонансных параметрических эффектов в формировании излучений ионно-циклотронного диапазона в магнитосфере Земли

Ионно-циклотронные волны возбуждаются в планетарных магнитосферах на частотах ниже ионных гирочастот. Наиболее полно такие волны изучены в магнитосфере Земли, где они относятся к геомагнитным пульсациям диапазона Pc1 с частотами порядка 1 Гц. Одним из наиболее интересных явлений, пока не получивших общепринятого объяснения, считается формирование структурированных пульсаций диапазона Pc1 (также называемых «жемчужинами»). Жемчужины (рис. 3) представляют собой последовательности частотно-модулированных всплесков излучения, наблюдаемых в полосе $\Delta\omega/\omega_0$ порядка 10–20%. По сложившимся к настоящему времени представлениям, возбуждение жемчужин связано с развитием в магнитосфере ионно-циклотронной неустойчивости. Однако причины амплитудно-частотной модуляции излучения до сих пор вызывают споры. Измерения, выполненные на спутниках в последнее десятилетие, показывают, что источник пульсаций Pc1 находится вблизи геомагнитного экватора и наблюдаемые сигналы формируются на одном проходе волной трассы от вершины силовой линии геомагнитного поля до по-

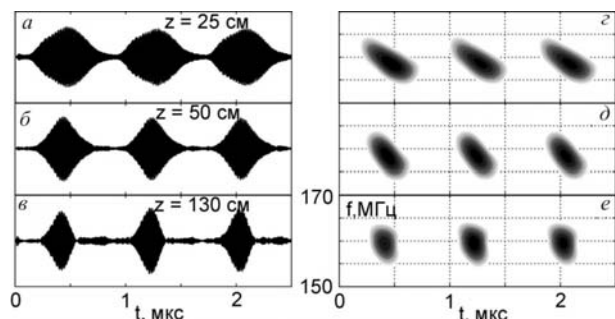


Рис. 2. Осциллограммы (а–в) и динамические спектры (г–е) пробных волн свистового диапазона, распространяющихся в нестационарном магнитном поле (амплитуда и период модуляции составляют 3% и 1 МГц соответственно), полученные в модельных экспериментах на плазменном стенде «Крот» на различных расстояниях от источника излучения.

верхности Земли [7]. Что касается амплитудно-частотной модуляции жемчужин, то ее причиной, согласно одной из сложившихся точек зрения, являются низкочастотные пульсации классов Pc3–5 [8], поскольку последовательности всплесков Pc1 часто наблюдаются одновременно с длиннопериодными геомагнитными колебаниями (рис. 3). Поэтому можно предположить, что амплитудно-частотная модуляция возникает (либо значительно усиливается) не в области источника непосредственно, а на трассе распространения ионно-циклотронных волн из-за нерезонансного параметрического преобразования частоты в нестационарном магнитном поле, а также за счет дисперсионных эффектов.

На нерезонансный параметрический механизм модуляции ионно-циклотронных волн длиннопериодными геомагнитными пульсациями указывает и то, что групповое запаздывание сигнала на трассе от экватора до поверхности Земли составляет величину, близкую периоду модуляции магнитного поля (~ 50–150 с). При этом возможны частотные сдвиги $\Delta\omega/\omega_0 \sim \Delta B/B_0 \sim 10^{-1}\text{--}10^{-2}$, т. е. глубина модуляции максимальна. Частотная модуляция может повлечь за собой сильную амплитудную модуляцию излучения, в первую очередь – из-за сильной дисперсии групповой скорости ионно-циклотронных волн в неоднородном геомагнитном поле при прохождении областей циклотронного резонанса с ионами гелия и кислорода, в небольших концентрациях присутствующих в земной магнитосфере.

Проведение модельных экспериментов в данном диапазоне сопряжено с серьезными трудностями, поскольку для адекватного моделирования необходимо создавать плазму с размерами, превышающими длины ионно-циклотронных волн, которые в лабораторных условиях составляют величину порядка 1 м. Однако для качественного объяснения некоторых эффектов в ионно-циклотронном диапазоне можно ис-

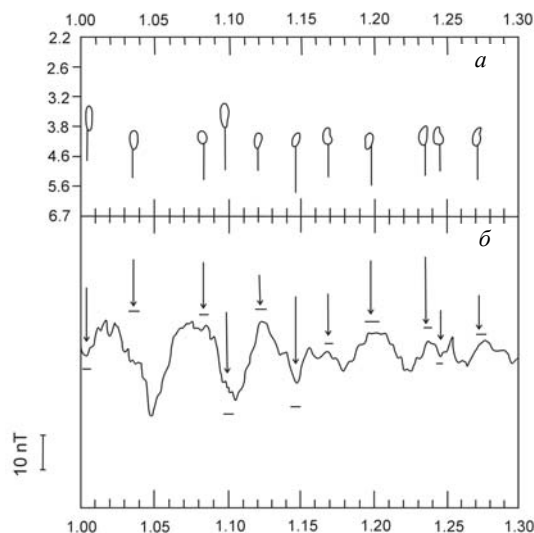


Рис. 3. а – динамический спектр структурированных пульсаций диапазона Pc1 («жемчужин»), по вертикали отложен период колебаний в секундах; б – регистрируемая одновременно квазипериодическая геомагнитная пульсация диапазона Pc5 с относительной амплитудой модуляции магнитного поля около 10%.

пользовать формальную и физическую общность ионных и электронных свистовых волн. В частности, их дисперсионные свойства очень близки: на частотах, близких электронному и ионному циклотронному резонансу, выражения для показателя преломления идентичны с точностью до замены электронных частот (плазменной и циклотронной) на соответствующие ионные частоты Ω_p и Ω_H :

$$n^2 = 1 - \frac{\Omega_p^2}{\Omega_H(\omega - \Omega_H)} \quad (5)$$

Схожесть зависимостей показателей преломления, групповых и фазовых скоростей волн обоих типов от плотности плазмы, величины магнитного поля и частоты излучения позволяет использовать результаты, полученные в экспериментах с электронными вистлерами, для объяснения явлений, наблюдаемых в диапазоне ионных свистов, в частности, для качественного объяснения эффектов амплитудно-частотной модуляции ионно-циклотронных волн в магнитосфере Земли.

в. Модуляция электромагнитных волн в магнитосфере Юпитера и проблема формирования всплесков декаметрового радиоизлучения S-типа

Радиоизлучение Юпитера наблюдается практически всегда, когда эта планета попадает в поле зрения радиотелескопов. Дискретные всплески S-типа [9] регистрируются в диапазоне от единиц до десятков мегагерц на частотах, близких значению электронной циклотронной частоты на ионосферных высотах. Эти сигналы представляют собой последовательности всплесков излучения с модулированной частотой заполнения (как правило, понижающейся во времени) и частотой следования в единицы – десятки герц (рис. 4). Вероятность появления радиоизлучения тесно связана с движением спутника Юпитера Ио. По современным представлениям, источником радиоизлучения является область ионосферы, лежащая в основании так называемой «трубки Ио» (Io flux-tube) – пучка силовых линий магнитного поля Юпитера, заметаемых спутником Ио при его орбитальном вращении.

В настоящее время удовлетворительных моделей формирования последовательностей всплесков S-типа не существует. Однако отмечается, что период следования всплесков близок характерным значениям периодов МГД-колебаний в ионосферном альфве-

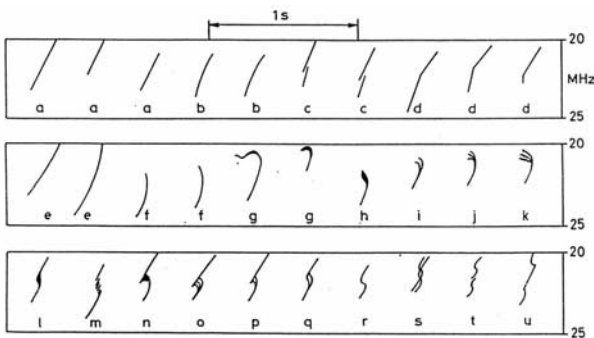


Рис. 4. Формы динамических спектров всплесков декаметрового радиоизлучения Юпитера S-типа согласно классификации Ринхимаа; ось частот направлена сверху вниз, как в [9].

новском резонаторе Юпитера. По-видимому, модуляция может объясняться воздействием низкочастотных колебаний на источник излучения либо на электромагнитные волны в процессе их распространения в магнитосфере Юпитера. Если модуляция возникает после выхода излучения из области источника, то предпочтение следует отдать эффектам нерезонансной параметрической амплитудно-частотной модуляции, обсуждавшимся выше. Действительно, волны возбуждаются на частотах, близких электронно-циклотронной или верхнегибридной частотам, и характеризуются малыми значениями групповой скорости и сильной дисперсией. В этом случае относительно небольшие частотные сдвиги (обычно не более $\Delta\omega/\omega_0 \sim 5\%$) могут объясняться вариациями магнитного поля соответствующей амплитуды, существующими в основании трубки Ио. Модуляцию амплитуды излучения в данном случае можно объяснить сильной дисперсией групповой скорости волн верхнегибридного диапазона.

Для проверки данного предположения был выполнен расчет, в рамках которого уравнение переноса частоты (1) для изначально монохроматического сигнала решалось методом характеристик. При этом предполагалось, что излучение распространяется в виде волны необыкновенной поляризации поперек направления магнитного поля (параллельно поверхности Юпитера); профиль возмущения магнитного поля задавался в форме плавной (гауссовой) функции с шириной порядка диаметра трубки Ио у ее основания (около 100 км). Выражение для показателя преломления волны в данном диапазоне записывается следующим образом:

$$n^2 = \frac{(\omega^2 - \omega_R^2)(\omega^2 - \omega_L^2)}{\omega^2(\omega^2 - \omega_{UH}^2)}, \quad (6)$$

где $\omega_{UH}^2 = \omega_p^2 + \omega_H^2$ – частота верхнего гибридного резонанса, ω_R и ω_L – частоты отсечек:

$$\omega_{R,L}^2 = \frac{1}{2}(\omega_H^2 + 2\omega_p^2 \pm \omega_H\sqrt{\omega_H^2 + 4\omega_p^2}) \quad (7)$$

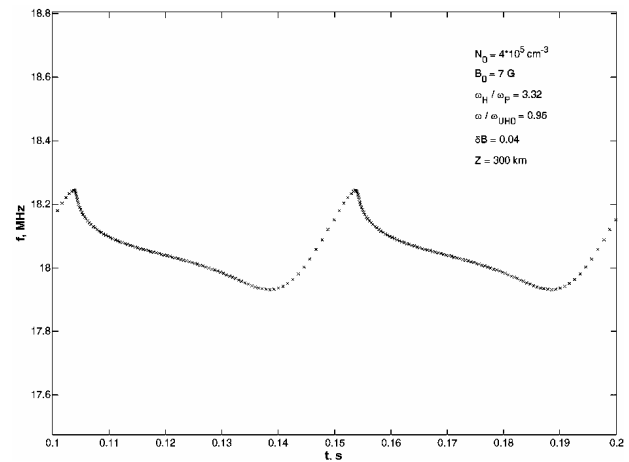


Рис. 5. Результаты расчетов динамического частотного спектра волны необыкновенной поляризации, распространяющейся перпендикулярно магнитному полю; задано гармоническое возмущение магнитного поля с периодом 50 мс и относительной амплитудой 4 %. Расчет выполнен для параметров, характерных для ионосферы Юпитера.

Результаты, близкие к данным натурных наблюдений, были получены в диапазоне частот $\omega_H < \omega < \omega_{UH}$: реалистичные значения частотных сдвигов соответствуют возмущениям магнитного поля частотой в несколько герц и максимальной относительной амплитудой на уровне 3–5 % (рис. 5). Таким образом, один из возможных механизмов формирования дискретной структуры спектров радиоизлучения Юпитера обусловлен нерезонансной модуляцией электромагнитных волн низкочастотными возмущениями магнитного поля, существующими в основании трубки Ио.

Выводы

Анализ натурных данных, результаты модельных экспериментов и расчетов показывают, что в формировании спектров электромагнитного излучения в космической плазме важную роль могут играть эффекты нерезонансного параметрического преобразования частоты и амплитуды. На конкретных примерах показано, что в физически разных диапазонах (свистовом, вернегибридном, ионно-циклотронном) могут развиваться сходные комплексы явлений, сопровождаемых модуляцией электромагнитных волн и формированием всплесковой структуры их динамического спектра. При этом модуляция обусловлена нестационарными возмущениями магнитного поля, оказывающими сильное влияние на замедленные волны с ярко выраженной дисперсией групповой скорости. В результате целый ряд явлений, пока не имеющих законченной физической интерпретации, можно объяснить в рамках единой модели, связанной с нерезонансной параметрической модуляцией частоты и амплитуды электромагнитных волн.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты №№ 05-08-50020 и 07-02-01023, а также Федерального агентства по науке и инновациям (ФЦНТП

«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники»; грант НШ-1087.2006.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галеев А.А., Сагдеев Р.З. Нелинейная теория плазмы // Вопросы теории плазмы. М.: Атомиздат, 1974. Вып. 7. С. 3–144.
2. Островский Л.А., Степанов Н.С. Нерезонансные параметрические явления в распределенных системах (обзор) // Известия ВУЗов, Радиофизика. 1971. Т. 14, № 4. С. 489–529.
3. Gushchin M.E., Korobkov S.V., Kostrov A.V. et al. Whistler waves in plasmas with time-varying magnetic field: laboratory investigation // Adv. Sp. Res. 2007. doi: 10.1016/j.asr.2007.06.027.
4. Gildenburg V.B., Kim A.V., Krupnov V.A., et al. Adiabatic frequency up-conversion of a powerful electromagnetic pulse producing gas ionization // IEEE Trans. Plasma Sci. 1993. V. 21, N 1. P. 34–44.
5. Manheimer M.W., Ripin B.H. High-power microwave plasma pulse compression // Phys. Fluids. 1986. V. 29. P. 2283–2291.
6. Maksimovic M., Harvey C.C., Santolik O., et al. Polarization and propagation of lion roars in dusk side magnetosheath // Ann. Geophys. 2001. V. 19. P. 1429–1438.
7. Loto'aniu T.M., Fraser B.J., **aters** C.L. Propagation of electromagnetic ion cyclotron wave energy in the magnetosphere // Geophys. Res. 2005. V. 110. P. A07214.
8. Plyasova-Bakounina T.A., Kangas J., Mursula K., et al. Pc1-2 and Pc4-5 pulsations observed at a network of high-latitude stations // J. Geophys. Res. 1996. V. 101, N A5. P. 10965–10975.
9. Riihimaa J.J. Evolution of the spectral fine structure of Jupiter's decametric S-storms // Earth, Moon and Planets. 1991. V. 53. P. 157–182.

ИПФ РАН, Нижний Новгород