

ОСОБЕННОСТИ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ КНЧ-ИЗЛУЧЕНИЙ ВНЕ ПЛАЗМОСФЕРЫ

© 2023 г. П. А. Беспалов^{1, 2, *}, О. Н. Савина^{2, **}, Г. М. Нещеткин^{2, ***}

¹Институт прикладной физики Российская академия наук (ИПФ РАН),
Нижний Новгород, Россия

²Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики” (НИУ ВШЭ),
Нижний Новгород, Россия

*e-mail: pbespalov@mail.ru

**e-mail: onsavina@mail.ru

***e-mail: gmheschetkin@edu.hse.ru

Поступила в редакцию 23.02.2023 г.

После доработки 06.04.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Рассматриваются новые сведения о КНЧ/ОНЧ-излучениях за пределами плазмосферы, содержащиеся в данных наблюдений, выполненных на космических аппаратах Van Allen Probes. Вблизи апогея траектории за плазмосферой отмечались квазипериодические последовательности всплесков электромагнитных излучений на частотах ниже 2 кГц с глубокой модуляцией интенсивности. Морфологически отдельный всплеск излучений подобен фрагменту излучений QR 2. Рассматриваемые последовательности всплесков могут иметь разную временную структуру. Во-первых, они могут быть четко периодическими. Во-вторых, в них могут периодически чередоваться всплески разной интенсивности. В-третьих, последовательность всплесков может иметь более сложную временную структуру. Возбуждение рассматриваемых шумовых по своей природе излучений, вероятно, происходит при развитии циклотронной неустойчивости в облаках оторвавшейся плазмы, которые существуют за пределами плазмосферы после магнитных возмущений. Многие свойства излучений объясняет теория плазменного магнитосферного мазера, допускающая существования автоколебательного процесса генерации излучений, обусловленного модуляцией анизотропии функции распределения энергичных электронов. Теория объясняет новые результаты наблюдений квазипериодических излучений с более сложной временной структурой при наличии периодического внешнего воздействия на динамику плазменного магнитосферного мазера. Во всех рассмотренных случаях было проверено в данных магнитометра космического аппарата отсутствие признаков геомагнитных пульсаций с периодами, сравнимыми с периодами повторения спектральных форм на спектрограммах электромагнитных излучений. Модельные расчеты показали, что акустико-гравитационная волна в ионосфере в основании трубки магнитного поля с облаком оторвавшейся плазмы может обеспечить формирование наблюдаемой временной структуры излучений.

DOI: 10.31857/S0016794023600205, EDN: UAXFPO

1. ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что внутри плазмосферы часто наблюдаются два типа квазипериодических электромагнитных излучений свистового диапазона, первые из которых (QR 1) связаны и вторые (QR 2) не связаны с геомагнитными пульсациями. QR 1 представляют собой модулированные шипения [Kimura, 1974; Sato et al., 1974; Korotova et al., 1975; Sato and Kokubun, 1981; Sazhin and Hayakawa, 1994] в условиях резонансного совпадения частоты геомагнитных пульсаций сжатия с частотой релаксационных колебаний в плазменном магнитосферном мазере [Беспалов и Клейменова, 1989]. QR 2 излучения [Smith et al., 1998; Engebretson et al., 2004; Маннинен и др., 2012] имеют более

четкие и устойчиво повторяющиеся спектральные формы и определяются фундаментальными процессами в электронных радиационных поясах, которые представляют собой периодические стадии накопления частиц в радиационных поясах и их высыпания в ионосферу [Беспалов, 1981; Bespalov, 1982].

В данной работе мы обсудим морфологические свойства и условия возбуждения значительно более редких квазипериодических излучений за пределами плазмосферы. В статье [Tixier and Cornilleau-Wehrlin, 1986] по данным с космических аппаратов GEOS отмечалось наличие квазипериодических ОНЧ-излучений вблизи экваториальной плоскости на магнитных оболочках $L \sim 5-7$

и их связь с синхронными наземными данными, похожими на QP 1 излучения. В статье [Nemes et al., 2015] по данным с космического аппарата Cluster отмечалось наличие квазипериодических излучений с частотами ниже нижнегибридной частоты в окрестности дневной экваториальной плазмопаузы. Эти излучения имеют гармоническую спектральную структуру, а период повторения спектральных форм равен примерно половине периода одновременно регистрируемых геомагнитных пульсаций сжатия.

Современные данные наблюдений с космических аппаратов Van Allen Probe, размещенные на сайте (<http://emfisis.physics.uiowa.edu/Flight/>), дали нам возможность подробнее рассмотреть квазипериодические излучения вне плазмосферы вблизи апогея траектории, где космический аппарат двигался сравнительно медленно и представлял собой удобную платформу для наблюдения временной эволюции излучений. Для большей конкретизации предмета исследования мы сосредоточились на квазипериодических излучениях, не связанных с заметными геомагнитными пульсациями сжатия.

О механизме квазипериодических излучений за пределами плазмосферы пока нет единого мнения, так как нет ясности с условиями реализации циклотронной неустойчивости в разреженной плазме. В данной работе предложена модель возбуждения не связанных с геомагнитными пульсациями квазипериодических излучений за пределами плазмосферы. Полученные результаты указывают на влияние атмосферных акустико-гравитационных возмущений на процессы взаимодействия волн и частиц в магнитосфере, посредством периодической модуляции коэффициента отражения электромагнитных волн от ионосферы сверху [Савина и Беспалов, 2022].

В разделе 2 рассмотрены примеры квазипериодических электромагнитных излучений, не связанных с геомагнитными пульсациями за пределами плазмосферы. В разделе 3 предложена модель возбуждения не связанных с геомагнитными пульсациями квазипериодических излучений за пределами плазмосферы. В разделе 4 рассмотрены уравнения теории плазменного магнитосферного мазера с периодическим внешним воздействием. В разделе 5 результаты модельных теоретических расчетов сопоставлены с данными наблюдений. В разделе 6 суммированы результаты работы.

2. ПРИМЕРЫ НЕ СВЯЗАННЫХ С ГЕОМАГНИТНЫМИ ПУЛЬСАЦИЯМИ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПЛАЗМОСФЕРЫ

За пределами плазмосферы установлено наличие трех разновидностей квазипериодических

электромагнитных излучений не связанных с геомагнитными пульсациями сжатия. Прежде всего, это сравнительно четкие квазипериодические излучения QP 2, в которых отдельные шумовые всплески повторяются почти периодически. В данной работе в качестве примера таких излучений мы рассматриваем квазипериодические излучения КНЧ диапазона, зарегистрированные 23.03.2018 г. между 12:10 и 12:50 UT при умеренном геомагнитном возмущении ($Kp = 2$). Для периода наблюдений: давление солнечного ветра ~ 2.1 нПа, концентрация солнечного ветра ~ 9 см $^{-3}$, скорость солнечного ветра ~ 430 км/с, вертикальная составляющая межпланетного магнитного поля $B_z \sim 0.7$ нТл. Это событие произошло в утреннее время LT = 07:40–08:20. Излучения наблюдались вне плазмосферы, концентрация фоновой плазмы была порядка 17 см $^{-3}$ и существенно не изменялась на протяжении рассматриваемого временного промежутка. Зона наблюдения соответствовала магнитной оболочке вблизи $L \sim 4.2$.

Мы использовали данные наблюдений, полученные с помощью прибора EMFISIS (Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science) на космическом аппарате Van Allen Probe A [Kletzing et al., 2013]. На рис. 1a представлен динамический спектр в частотном диапазоне ниже 300 Гц, построенный по данным спектральной матрицы WFR (WaveForm Receiver) с помощью браузера *Autoplot*. Квазипериод данных КНЧ-излучений около 150 с. Отличительной особенностью этих излучений является четкая периодичность похожих по размеру и частотному диапазону спектральных элементов.

Для уточнения существования геомагнитных пульсаций со схожим периодом мы использовали данные локального магнитного поля, зафиксированные феррозондовым магнитометром EMFISIS для такого же временного интервала. В магнитном поле, показанном на рис. 2a, не наблюдается значительных пульсаций. Небольшие вариации магнитного поля с периодом около 10 с, возможно, обусловлены вращением космического аппарата.

Для построения графика зависимости плотности энергии электромагнитных волн от времени (рис. 1б) мы ограничились диапазоном частот 110–210 Гц. Для нескольких коротких периодов мы экспортировали данные электромагнитного поля с высоким разрешением в формате *MatLab* файлов. По отфильтрованной части сигнала, отвечающей указанному частотному диапазону, была проведена оценка плотности электромагнитной энергии. Полученные значения были использованы как калибровочные, что позволило определить по цветовой шкале динамического спектра временную зависимость плотности энергии электромагнитных излучений $\epsilon(t)$.

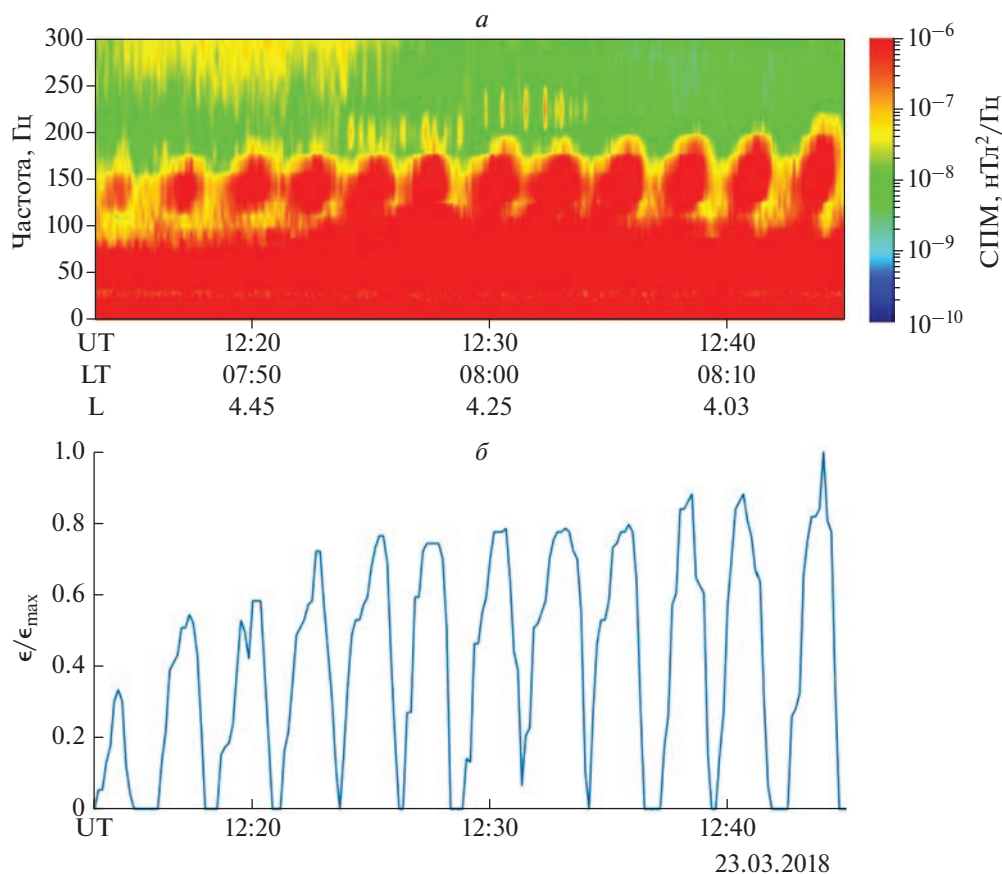


Рис. 1. Динамический спектр плотности мощности (СПМ) вариаций полного магнитного поля по данным космического аппарата Van Allen Probe A для события 23.03.2018 г. (а) и временная зависимость относительной энергии электромагнитных волн в частотном диапазоне 110–210 Гц (б).

Хорошо известно, что квазипериодические КНЧ-излучения могут быть связаны с геомагнитными пульсациями с периодами, сравнимыми с периодами повторения спектральных форм на спектрограммах излучений. Мы тщательно проверили наличие этого фактора. На рис. 2а, где показана временная зависимость магнитного поля в месте пролета космического аппарата, не наблюдается заметных изменений на временных масштабах порядка 150 с. На рис. 2б приведен спектральный состав геомагнитного поля в рассматриваемый временный промежуток. Признаков спектральных линий с частотами, близкими к 7 мГц не наблюдалось, поэтому можно сделать вывод, что эти квазипериодические излучения не относятся к типу QR 1. Из-за четкой периодичности сигнала, морфологически этот пример скорее подобен QR 2.

Анализ наблюдений показал наличие редких излучений, в которых спектральные элементы разной интенсивности довольно четко периодически чередуются. На рис. 3а представлен динамический спектр квазипериодических излучений, наблюдавшихся 03.02.2016 г. между 3:30 и

4:00 UT при значительном геомагнитном возмущении ($Kp = 4.7$). Для рассматриваемого временного промежутка: давление солнечного ветра ~ 2.1 нПа, плотность солнечного ветра ~ 4 cm^{-3} , скорость солнечного ветра ~ 360 км/с, вертикальная составляющая межпланетного магнитного поля $B_z \sim -4$ нТл. Это событие произошло в утреннее время LT = 07:40–08:10. Зона наблюдения соответствовала магнитной оболочке вблизи $L \sim 4.2$. Событие наблюдалось вне плазмосферы при концентрации фоновой плазмы порядка 12 cm^{-3} . На рис. 3а представлен спектр частотного диапазона ниже 250 Гц, построенный аналогично спектру на рис. 1а. Квазипериод данных КНЧ-излучений примерно 180 с. Отличительной особенностью этих излучений является периодическое чередование всплесков разной интенсивности. График зависимости средней плотности энергии от времени (рис. 3б) строился по описанной выше методике, при его построении мы ограничились диапазоном частот 127–180 Гц.

Для уточнения существования геомагнитных пульсаций со схожим периодом мы использовали

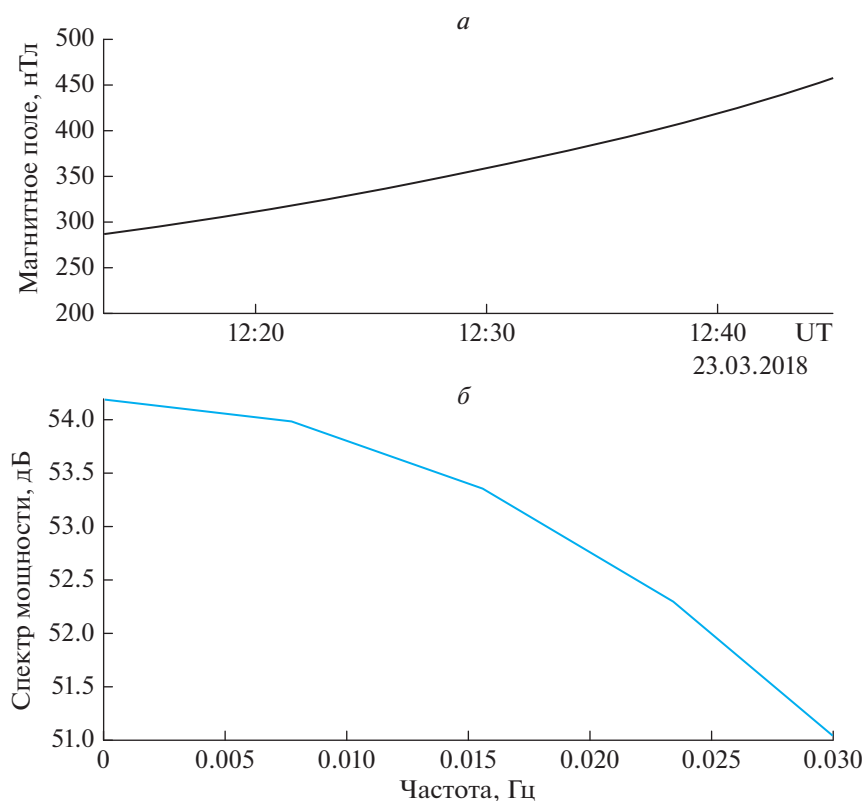


Рис. 2. Временная зависимость магнитного поля (а) и частотное распределение энергии вариаций магнитного поля (б) по данным с космического аппарата Van Allen Probe A 23.03.2018 г.

данные локального магнитного поля, зафиксированные феррозондовым магнитометром EMFISIS. На рис. 4а, где представлена временная зависимость магнитного поля в месте пролета космического аппарата, не наблюдаются заметные изменения на временных масштабах порядка 180 с. Спектральный состав магнитного поля (рис. 4б) показывает, что нет спектральных линий с частотами близкими 6 МГц, поэтому эти излучения не относятся к типу QR 1 и ввиду отсутствия четкой временной периодичности также не являются обычными QR 2 излучениями.

Встречаются и более сложные по своей временной структуре последовательности всплесков излучений. На рис. 5а представлен динамический спектр квазипериодических излучений, наблюдавшихся 14.05.2016 г. между 10:20 и 11:00 UT при умеренном геомагнитном возмущении ($Kp = 2$) для частот ниже 350 Гц. Для периода наблюдений: давление солнечного ветра ~ 2.1 нПа, концентрация солнечного ветра ~ 15 см $^{-3}$, скорость солнечного ветра ~ 350 км/с, вертикальная составляющая межпланетного магнитного поля $B_z \sim -4$ нТл. Это событие произошло в утреннее время LT = 08:15–08:55. Зона наблюдения соответствовала магнитной оболочке вблизи $L \sim 4.4$. Наблюдалось

явление вне плазмосферы при концентрации фоновой плазмы порядка 15 см $^{-3}$. Квазипериод данных КНЧ-излучений примерно 180 с. Их отличительной особенностью является более сложная структура спектра с отсутствием четких закономерностей.

Для построения графика зависимости средней плотности энергии электромагнитных волн от времени (рис. 5б) мы ограничились частотным интервалом 98–198 Гц, график строился по описанной выше методике. В магнитном поле, представленном на рис. 6а, не происходит значительных изменений с периодами, близкими к 180 с. В спектральном составе магнитного поля, показанном на рис. 6б, спектральных линий с частотами близкими 6 МГц не наблюдается, поэтому эти излучения не относятся к типу QR 1 и ввиду отсутствия четкой временной периодичности не являются обычными QR 2 излучениями.

О частоте появления рассмотренных в этом разделе излучений можно судить по следующему результату. Проанализировав динамические спектры электромагнитных излучений за апрель и май 2016 г., мы обнаружили вне плазмосферы семь примеров сравнительно четких квазипериодических излучений типа QR2, четыре примера излу-

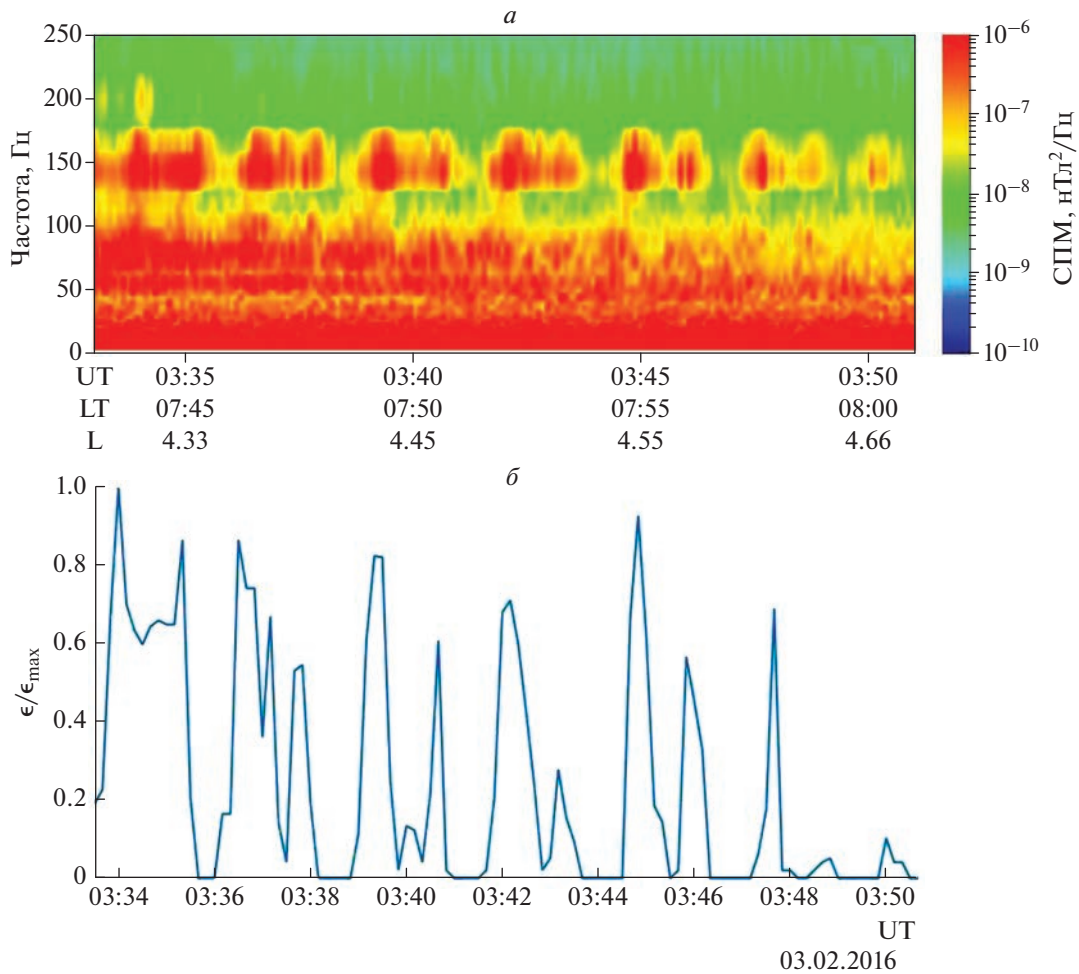


Рис. 3. Динамический спектр плотности мощности вариаций полного магнитного поля по данным космического аппарата Van Allen Probe A для события 03.02.2016 г. (а) и временная зависимость относительной плотности энергии электромагнитных волн в частотном диапазоне 127–180 Гц (б).

чений, в которых спектральные элементы разной интенсивности довольно четко периодически чередуются, и четырнадцать примеров более сложных по своей временной структуре всплесков излучений.

3. МОДЕЛЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ НЕ СВЯЗАННЫХ С ГЕОМАГНИТНЫМИ ПУЛЬСАЦИЯМИ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПЛАЗМОСФЕРЫ

За пределами плазмосферы условия генерации излучений за счет эффективной внутри плазмосферы циклотронной неустойчивости сильно ограничены. Для ее реализации с не экспоненциально малым инкрементом должны выполняться два условия [Беспалов и Трахтенгерц, 1980]:

$$W_{\perp} > W_{\parallel}, \quad \beta_* = \frac{\omega_p^2 \langle V_{\parallel}^2 \rangle}{\omega_B^2 c^2} = \frac{\omega_p^2 W_{\parallel}}{\omega_B^2 256} \approx 0.03W > 2. \quad (1)$$

Здесь $W_{\perp}$, $W_{\parallel}$ и W — средняя энергия поперечного и продольного к магнитному полю движения энергичных электронов и их полная энергия в кэВ; ω_p и ω_B — электронная плазменная и циклотронная частоты. С наличием небольшой поперечной анизотропии функции распределения энергичных электронов часто нет проблем. Однако, второе условие (1) в разреженной плазме с типичным значением $\omega_p/\omega_B \approx 5$ трудно выполнимо. При выполнении условий (1) неустойчивость имеет заметный инкремент на частоте

$$\omega \sim \frac{\omega_B}{\beta_*} < \omega_B \left(1 - \frac{W_{\parallel}}{W_{\perp}} \right). \quad (2)$$

В приведенных в предыдущем разделе примерах частота возбуждаемых КНЧ-излучений сравнительно низкая, и должно выполняться еще более жесткое по сравнению с (1) условие $\beta_* > 10$, реа-

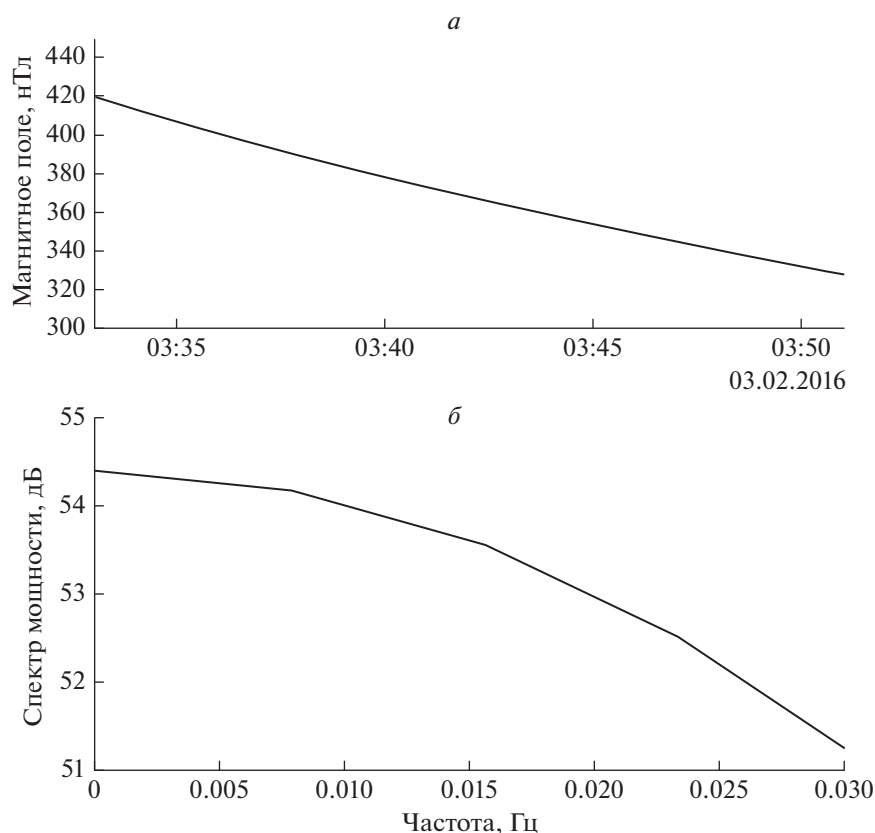


Рис. 4. Временная зависимость магнитного поля (а) и частотное распределение энергии вариаций магнитного поля (б) по данным с космического аппарата Van Allen Probe A 03.02.2016 г.

лизация которого в разреженной плазме невозможна.

Отмеченную закономерность можно пояснить на следующем интересном примере из данных наблюдений. На рис. 7а показан динамический спектр излучений, наблюдавшихся 29.05.2016 г. между 15:50 и 17:20 UT при умеренном геомагнитном возмущении ($Kp = 1$). Для периода наблюдений: давление солнечного ветра ~ 2.1 нПа, концентрация солнечного ветра ~ 2 см $^{-3}$, скорость солнечного ветра ~ 440 км/с, вертикальная составляющая межпланетного магнитного поля $B_z \sim -1$ нТл. Это событие произошло в утреннее время LT = 06:30–08:00. Зона наблюдения соответствовала магнитной оболочке вблизи $L \sim 5.3$. Космический аппарат пересекал трубки магнитного поля с относительно плотной плазмой. В каждой из них отмечался всплеск волновой активности. О том, что излучения наблюдались за пределами плазмосферы в облаках оторвавшейся плазмы свидетельствуют колебания в значениях концентрации фоновой плазмы (рис. 7б). На рис. 7а представлен спектр частотного диапазона ниже 2000 Гц, построенный по данным спектральной матрицы WFR с помощью браузера Autoplot. Отличительной особенностью этих излучений явля-

ется наблюдаемая зависимость между положением всплесков излучений во времени и повышением концентрации фоновой плазмы. Для построения графика зависимости средней плотности энергии электромагнитных волн от времени (рис. 7в) мы ограничились частотным интервалом 80–2000 Гц.

По нашему мнению, именно в облаках оторвавшейся плазмы, сильно вытянутых вдоль магнитного поля (см. рис. 8), возбуждаются квазипериодические излучения за пределами плазмосферы. Наблюдение излучений становится более вероятным, когда из-за особенностей рейтрейсинга нарушается волновая “герметичность” облаков и излучения заполняют значительные объемы космической плазмы поперек магнитного поля. Скорее всего электромагнитные волны покидают область плотной плазмы вблизи ионосферы. То есть, мы предполагаем, что область плотной плазмы периодически вспыхивает как нить в лампе накаливания. В рамках такой модели можно объяснить основные свойства временной структуры рассмотренных излучений. Отметим, что согласно выводам [Chappel, 1974] облака оторвавшейся плазмы существуют вне плазмосферы в течение примерно недели после магнитных возмущений.

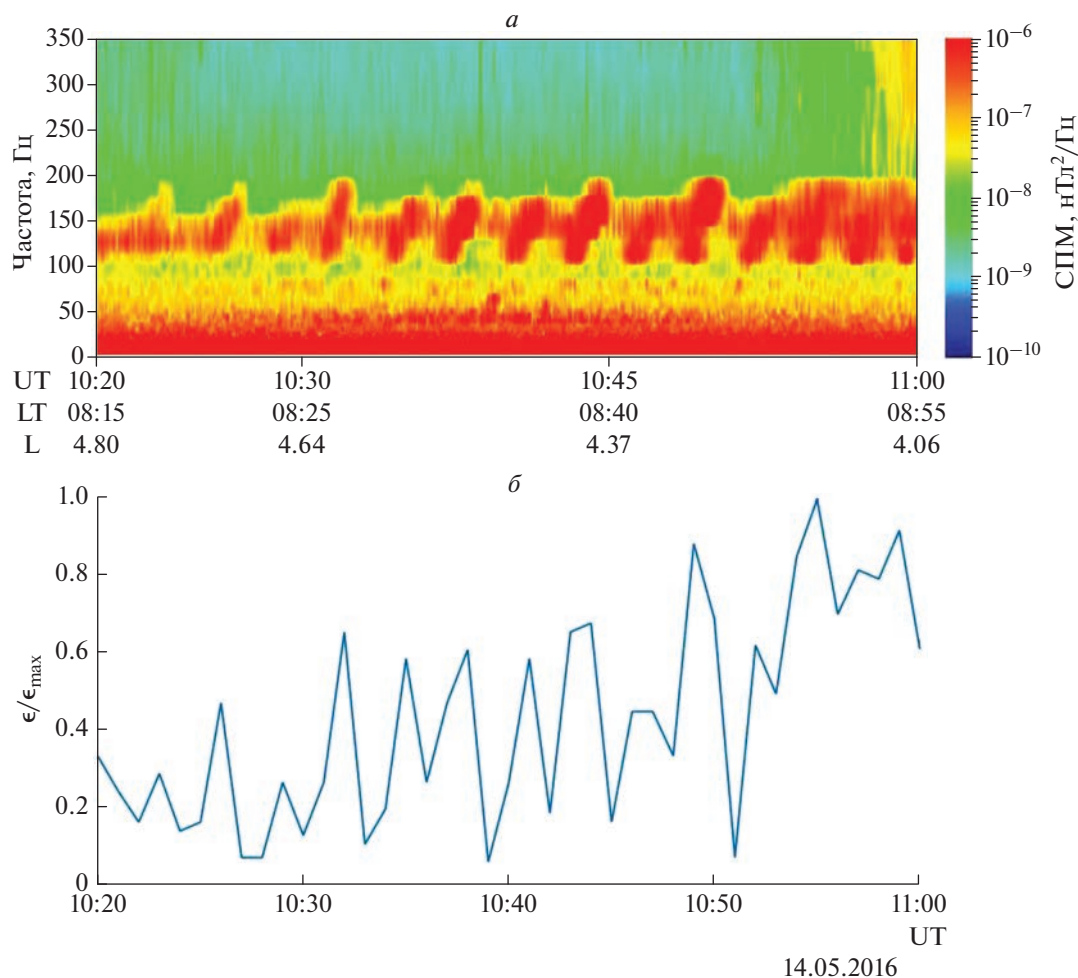


Рис. 5. Динамический спектр плотности мощности вариаций полного магнитного поля по данным космического аппарата Van Allen Probe A для события 14.05.2016 г. (а) и временная зависимость относительной плотности энергии электромагнитных волн в частотном диапазоне 98–198 Гц (б).

4. УРАВНЕНИЯ ТЕОРИИ ПЛАЗМЕННОГО МАГНИТОСФЕРНОГО МАЗЕРА С ПЕРИОДИЧЕСКИМ ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Для анализа сравнительно медленных ($\Delta t > T_b$, T_{gr}) нестационарных процессов в плазменном магнитосферном мазере (ПММ) мы можем использовать самосогласованную систему квазилинейных уравнений, усредненную по периоду осцилляции энергичных частиц (T_b — период баунс-осцилляций) и волн (T_{gr} — период группового распространения в магнитосферном резонаторе) между точками отражения. При типичных магнитосферных условиях в облаках оторвавшейся плазмы спектр возбуждаемых посредством циклотронной неустойчивости электромагнитных волн сравнительно узкий и локализован в области частот, низких по сравнению с гирочастотой элек-

трона, но больших нижегибридной частоты на магнитном экваторе ($\omega_{LHF} < \omega < \omega_{BL}$). Тогда система квазилинейных уравнений записывается в виде [Беспалов и Трахтенгерц, 1980; Trakhtengerts and Rycroft, 2008]

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial F}{\partial x} \right) - \frac{F}{T} + J, \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial t} &= \left(\int_0^{\infty} \int_{x_c}^{x_{\max}} K \frac{\partial F}{\partial x} dx dV \right) \in -v \epsilon. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $F(t, x, V)$ — функция распределения, $\epsilon(t)$ — плотность энергии электромагнитных волн, $J(x, V)$ — мощность источника энергичных электронов, $T(V)$ — время жизни частиц в магнитной ловушке без учета циклотронной неустойчивости (например, из-за столкновений), $x = V_{\perp L}/V$ — си-

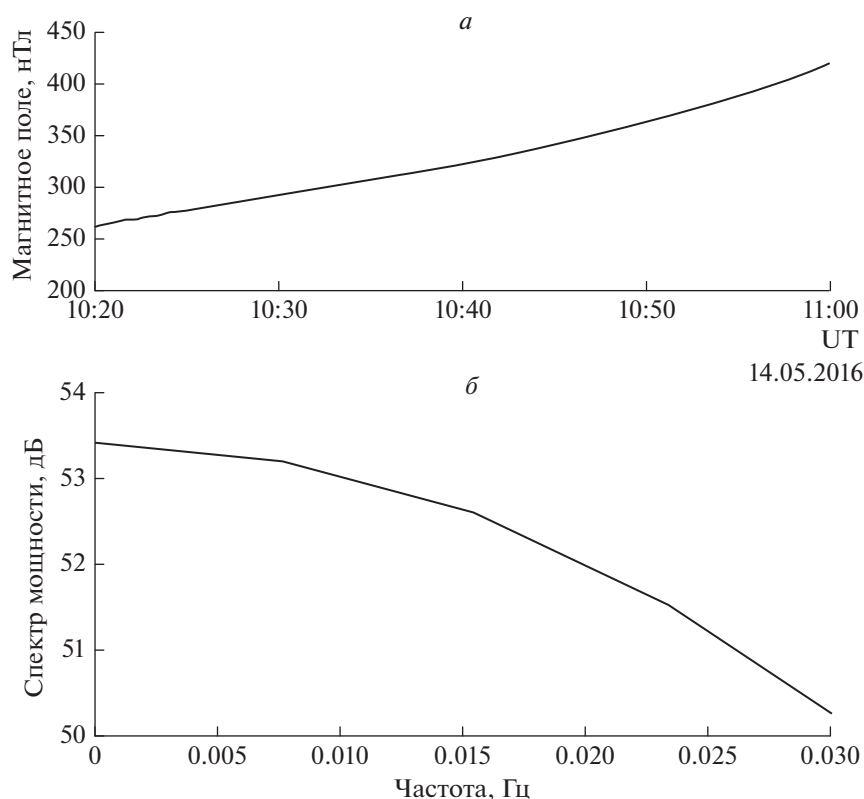


Рис. 6. Временная зависимость магнитного поля (а) и частотное распределение энергии вариаций магнитного поля (б) по данным с космического аппарата Van Allen Probe A 14.05.2016 г.

нус питч-угла энергичного электрона в центре магнитной ловушки,

$$\nu = 2 \frac{|\log R|}{T_{gr}} \quad (4)$$

средний декремент затухания волн, R — коэффициент отражения электромагнитных волн, падающих на ионосферу сверху. В уравнениях (3) $D(x, V)$, $K(x, V)$ и $x_{\max}(V)$ — известные неотрицательные функции и x_c — граница конуса потерь в пространстве скоростей.

Решение интегродифференциальных уравнений (3) зависит от величины и угловой зависимости мощности источника частиц J в трубке магнитного поля. О мощности источника частиц J мы знаем только, что она положительна и по потоку высыпавшихся в ионосферу электронов можем оценить интегральную мощность. Об угловой зависимости мощности источников частиц нет достоверной информации. Поэтому мы можем позволить себе определенную фантазию. Если мощность источников частиц имеет подходящую угловую зависимость то, как было показано в работах [Беспалов, 1981; Besspalov, 1982], стационарное состояние ПММ, отвечающее балансу

между поступлением частиц от источника и их высыпанием в ионосферу, неустойчиво и в системе развивается колебательный процесс, не связанный с геомагнитными пульсациями. Этот режим работы ПММ обеспечивает возбуждение излучений типа QR 2.

5. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Для демонстрации возможностей теории в объяснении свойств квазипериодических электромагнитных излучений, не связанных с геомагнитными пульсациями, мы ограничимся рассмотрением случая, когда мощность источника частиц имеет малый разброс по модулю скорости вблизи величины, удовлетворяющей условию (2). Кроме того, мы можем обогатить картину и учесть наличие слабых периодических внешних воздействий на динамику ПММ. В принципе это могут быть геомагнитные пульсации сжатия или акустико-гравитационные возмущения в области отражения в ионосфере. Оба эти фактора математически равнозначны, так как дают вклад в усредненный инкремент, от которого во втором уравнении (3) экспоненциально зависит эволюция

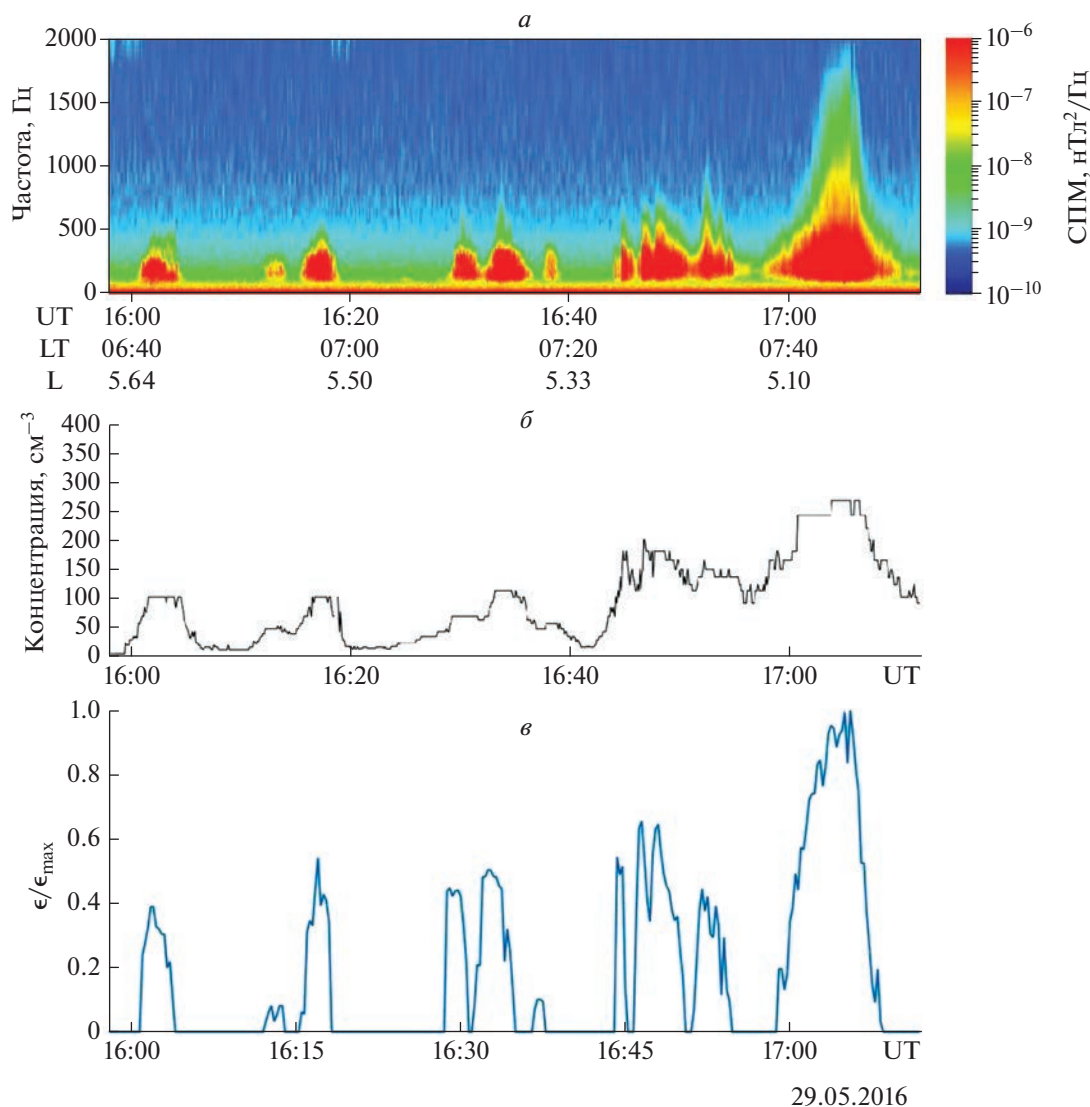


Рис. 7. Динамический спектр плотности мощности вариаций полного магнитного поля по данным космического аппарата Van Allen Probe A для события 29.06.2016 г. (а), временная зависимость концентрации фоновой плазмы (б) и относительной плотности энергии электромагнитных волн в частотном диапазоне 80–2000 Гц (в).

плотности электромагнитных волн $\epsilon(t)$. В рассмотренных в разделе 2 примерах не были замечены геомагнитные пульсации. В свою очередь инфразвуковые волны различной природы с периодами менее пяти минут и горизонтальным масштабом порядка 100 км регулярно наблюдаются в ионосфере [Blanc, 1985]. Учет периодического изменения коэффициента отражения от ионосферы сверху меняет величину (4):

$$v = v_0(1 + \mu \cos(\Omega t)). \quad (5)$$

Предположим, что мощность источника частиц в трубке магнитного поля представляет собой линейную комбинацию двух первых угловых мод $Z_1(x)$ и $Z_2(x)$ оператора питч-угловой диффу-

зии с граничным условием на конусе потерь, отвечающем слабой питч-угловой диффузии [Kennel and Petschek, 1966]. Параллельно удобно перейти к безразмерным переменным

$$\begin{aligned} J(x) &\rightarrow j = j_1 Z_1(\xi) + j_2 Z_2(\xi) \geq 0, \\ F(t, x) &\rightarrow f(\tau, x) = N_1(\tau) Z_1(\xi) + N_2(\tau) Z_2(\xi), \\ \epsilon(t)/\epsilon_{\max} &\rightarrow \epsilon(\tau)/\epsilon_{\max}, \quad v_0 t = \tau, \\ \frac{x - x_c}{x_{\max} - x_c} &= \xi, \quad v/v_0 = (1 + \mu \cos(\Delta\tau)). \end{aligned} \quad (6)$$

Используя свойство ортогональности собственных функций $Z_1(x)$ и $Z_2(x)$, конкретный вид которых приведен в [Беспалов и Трахтенгерц, 1980], интегриродифференциальная система уравнений (3)

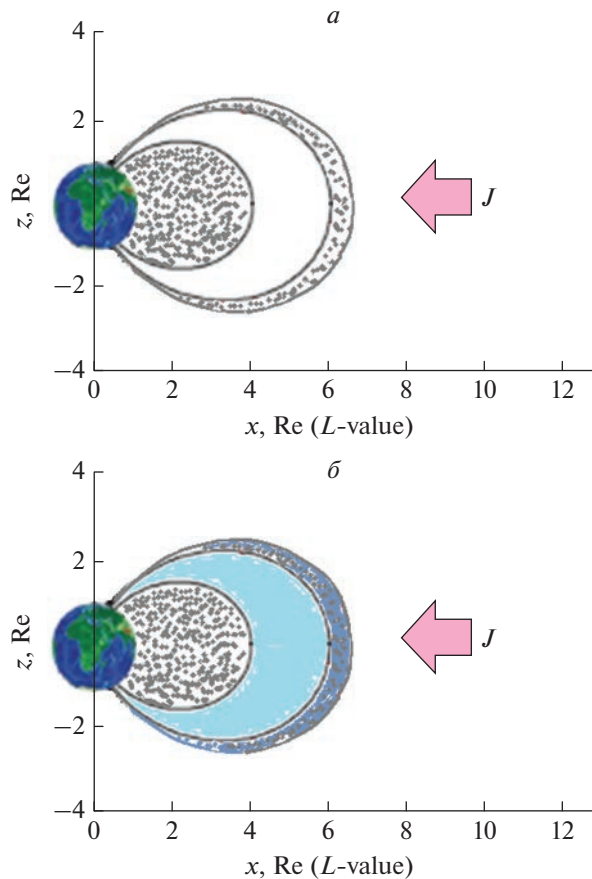


Рис. 8. Схема пространственного распределения плотности энергии электромагнитных волн, показанных оттенками синего, для облака оторвавшейся плазмы при $L \approx 6$ между электромагнитными всплесками (а) и во время всплеска (б).

сводится к системе трех обыкновенных дифференциальных уравнений [Беспалов, 1987]:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{d\tau} &= -p_1^2 \varepsilon N_1 - \eta N_1 + j_1, \\ \frac{dN_2}{d\tau} &= -p_2^2 \varepsilon N_2 - \eta N_2 + j_2, \\ \frac{d\varepsilon}{d\tau} &= h_1 \varepsilon N_1 + h_2 \varepsilon N_2 - (1 + \mu \cos(\Delta\tau)) \varepsilon, \end{aligned} \quad (7)$$

в которой можно вычислить четыре коэффициента $p_1 = 0.548$, $p_2 = 2.475$, $h_1 = 0.0566$, $h_2 = -0.6864$. Типичное время жизни энергичных электронов в магнитной ловушке без учета циклотронной неустойчивости определяет величину $\eta = 0.01$. Мощность источника частиц характеризуют две величины, которые не должны быть слишком большими для реализации режима слабой питч-угловой диффузии. Мощность источника частиц будет гарантировано неотрицательна, если $j_1 > j_2 > 0$. Мы выберем $j_1 = 0.4$, $j_2 = 0.01$. Тогда без внешних периодических воздействий $\mu = 0$ в системе реализуются периодические автоколебания. Зависимость от времени плотности энергии элек-

тромагнитных волн показана на рис. 9а. Эта модельная зависимость согласуется с данными наблюдений, показанными на рис. 1б.

Если имеет место периодическая модуляция коэффициента отражения от ионосферы сверху, обусловленная инфразвуковой волной на ионосферных высотах, то параметр $\mu \neq 0$. Вполне достижимо значение $\mu = 0.1$. Когда период инфразвуковой волны равен периоду автоколебаний в ПММ, то реализуется периодическое чередование всплесков разной интенсивности. Такая возможность показана на рис. 9б. Эта модельная временная зависимость прослеживается на графике (см. рис. 3б), построенном по данным наблюдений.

Если инфразвуковая волна в ионосфере существует, но ее период заметно отличается от периода автоколебаний в ПММ, то имеет место более сложная последовательность электромагнитных всплесков с разной интенсивностью. Такая возможность показана на рис. 9в. Эта модельная временная зависимость согласуется с данными наблюдений, показанными на рис. 5б.

Результаты проведенных модельных расчетов соответствуют данным наблюдений. Без внешне-

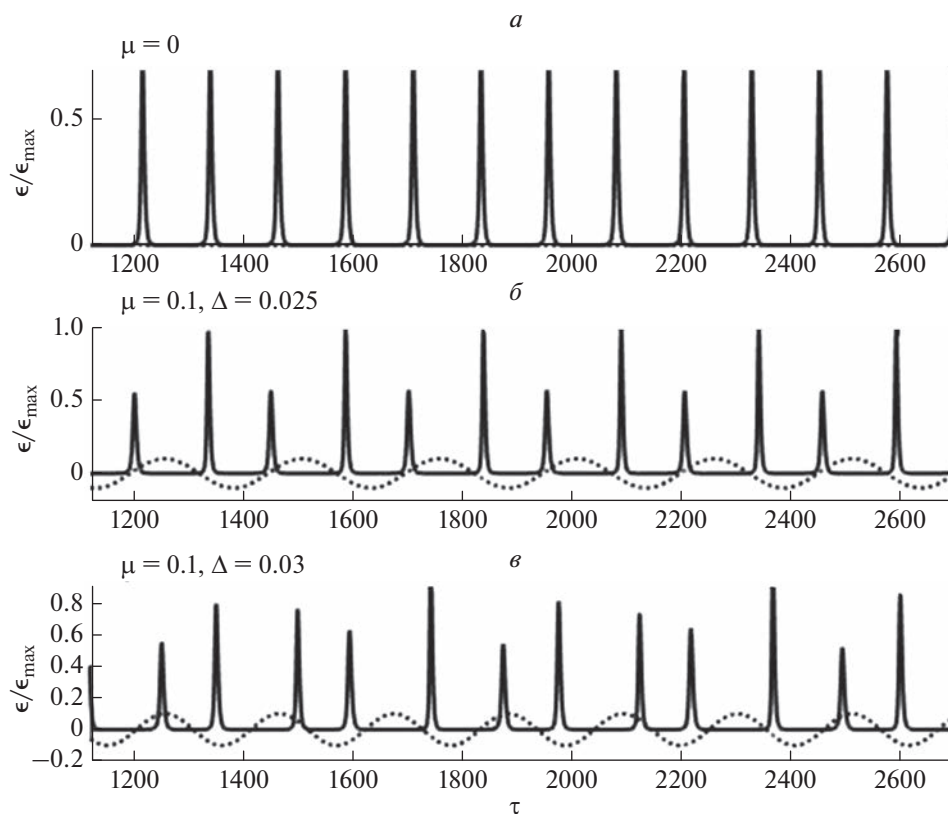


Рис. 9. Модельная зависимость от времени плотности энергии электромагнитных волн в ПММ, соответствующая решениям системы уравнений (7): периодические автоколебания при отсутствии внешних воздействий (а), периодическое чередование всплесков разной интенсивности (б), более сложная последовательность всплесков с разной интенсивностью (в), Линия из точек показывают период инфразвуковой волны в ионосфере.

го воздействия в ПММ могут иметь место периодические автоколебания с глубокой модуляцией плотности энергии волн. Если частота внешнего воздействия соответствует периоду квазипериодических излучений, то формируется последовательность всплесков с чередующейся интенсивностью. Иначе получаются последовательности всплесков более сложного типа.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе:

— Приведены примеры не сопровождающихся заметными геомагнитными пульсациями электромагнитных квазипериодических КНЧ-излучений за пределами плазмосферы, в которых шумовые всплески повторяются с периодами 60–150 с.

— Квазипериодические излучения с глубокой модуляцией плотности энергии волн могут быть четко периодическими, в них могут периодически чередоваться всплески разной интенсивности и также они могут иметь более сложную временную структуру.

— Обосновано предположение о возбуждении квазипериодических излучений за пределами плазмосферы в облаках оторвавшейся плазмы, вытянутых вдоль магнитного поля.

— Теория ПММ, учитывающая модуляцию анизотропии функции распределения энергичных электронов, позволяет количественно интерпретировать основные свойства квазипериодических излучений, не связанных с геомагнитными пульсациями сжатия.

— Временную структуру квазипериодических излучений можно объяснить, предполагая, что коэффициент отражения электромагнитных волн от ионосферы сверху испытывает периодические изменения, обусловленные наличием акустико-гравитационных возмущений на ионосферных высотах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-22-00397).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Беспалов П.А.* Самомодуляция излучения плазменного циклотронного “мазера” // Письма в ЖЭТФ. Т. 33. № 4. С. 192–195. 1981.
- *Беспалов П.А.* Эффективное насыщение поглощения в плазменном магнитосферном мазере // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 30. № 2. С. 289–302. 1987.
- *Беспалов П.А., Клейменова Н.Г.* Влияние геомагнитных пульсаций на свистовые излучения вблизи плазмопаузы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 29. № 2. С. 177–191. 1989.
- *Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю.* Циклотронная неустойчивость радиационных поясов Земли / Вопросы теории плазмы. Т. 10. М.: Атомиздат. С. 88–163. 1980.
- *Маннинен Ю., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Беспалов П.А. и Райта Т.* Квазипериодические ОНЧ излучения, ОНЧ хоры и геомагнитные пульсации РС4 (событие 3 апреля 2011 г.) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 1. С. 82–92. 2012.
- *Савина О.Н., Беспалов П.А.* Отклик плазменного магнитосферного мазера на атмосферные возмущения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 5. С. 599–606. 2022.
<https://doi.org/10.31857/S001679402205011X>
- *Bespalov P.A.* Self-excitation of periodic cyclotron instability regimes in a plasma magnetic trap // Phys. Scripta. V. 1982. N 2B. P. 576–579. 1982.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/1982/T2B/044>
- *Blanc E.* Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural and artificial sources — A summary // Ann. Geophys. V. 3. № 6. P. 673–687. 1985.
- *Chappell C.R.* Detached plasma regions in the magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 79. № 13. P. 1861–1870. 1974.
<https://doi.org/10.1029/JA079i013p01861>
- *Engebretson M.J., Posch J.L., Halford A.J., Shelburne G.A., Smith A.J., Spasojevic M., Inan U.S., Arnoldy R.L.* Latitudinal and seasonal variations of quasiperiodic and periodic VLF emissions in the outer magnetosphere // J. Geophys. Res. — Space. V. 109. № 5. ID A05216. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2003JA010335>
- *Kennel C.F., Petschek H.E.* Limit on stably trapped particle fluxes // J. Geophys. Res. V. 71. № 1. P. 1–28. 1966.
<https://doi.org/10.1029/JZ071i001p00001>
- *Kimura I.* Interrelation between VLF and ULF emissions // Space Sci. Rev. V. 16. № 3. P. 389–411. 1974.
<https://doi.org/10.1007/BF00171565>
- *Kletzing C.A., Kurth W.S., Acuna M. et al.* The Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) on RBSP // Space Sci. Rev. V. 179. № 1–4. P. 127–181. 2013.
<https://doi.org/10.1007/s11214-013-9993-6>
- *Korotova G.I., Kleimenova N.G., Raspopov O.M.* Modulation of VLF hiss by geomagnetic pulsations // Geomagn. Aeronomy. V. 15. P. 149–151. 1975.
- *Nemec F., Santolík O., Hrbáková Z., Pickett J.S., Cornilleau-Wehrlin N.* Equatorial noise emissions with quasiperiodic modulation of wave intensity // J. Geophys. Res. — Space. V. 120. № 4. P. 2649–2661. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020816>
- *Sato N., Hayashi K., Kokubun S., Oguti T., Fukunishi H.* Relationships between quasi-periodic VLF emission and geomagnetic pulsations // J. Atmos. Terr. Phys. V. 36. № 9. P. 1515–1526. 1974.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(74\)90229-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(74)90229-3)
- *Sato N., Kokubun S.* Interaction between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations: Regular period ELF-VLF pulsations and their geomagnetic conjugacy // J. Geophys. Res. — Space. V. 86. № 1. P. 9–18. 1981.
<https://doi.org/10.1029/JA086iA01p00009>
- *Sazhin S.S., Hayakawa M.* Periodic and quasiperiodic VLF emissions // J. Atmos. Terr. Phys. V. 56. № 6. P. 735–753. 1994.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(94\)90130-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)90130-9)
- *Smith A.J., Engebretson M.J., Klatt E.M., Inan U.S., Arnoldy R.L., Fukunishi H.* Periodic and quasiperiodic ELF/VLF emissions observed by an array of Antarctic stations // J. Geophys. Res. — Space. V. 103. № 10. P. 23611–23622. 1998.
<https://doi.org/10.1029/98JA01955>
- *Tixier M., Cornilleau-Wehrlin N.* How are VLF quasiperiodic emissions controlled by harmonics of field line oscillations? The results of a comparison between ground and GEOS satellites measurements // J. Geophys. Res. — Space. V. 91. № 6. P. 6899–6919. 1986.
<https://doi.org/10.1029/JA091/A06p06899>
- *Trakhtengerts V.Y., Rycroft M.J.* Whistler and Alfvén mode cyclotron masers in space. Cambridge: Cambridge University Press, 354 p. 2008.