

## КОСМИЧЕСКИЕ ЦИКЛОТРОННЫЕ МАЗЕРЫ

В.Ю. Трахтенгерц, А.Г. Демехов

*Виктор Юрьевич Трахтенгерц, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий сектором физики магнитосферной и ионосферной плазмы в отделении астрофизики и физики космической плазмы Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород). Руководитель проекта 99-02-16175.*

*Андрей Геннадьевич Демехов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же сектора.*

Мазеры\* как генераторы когерентного микроволнового электромагнитного излучения, в том числе мазеры на циклотронном резонансе, хорошо известны и широко применяются в физических экспериментах, новых технологиях и медицине. Но «приоритет» в их изобретении принадлежит не человеку, а природе: в космических условиях мазеры, например циклотронные, — не менее типичное явление для планетных и звездных магнитосфер. Космические циклотронные мазеры, которые служат уже источником не микро, а макроволн, выполняют там важнейшую функцию, определяя уровень низкочастотного электромагнитного излучения и регулируя количество заряженных частиц высоких энергий в околопланетном пространстве.

### **Осцилляторы, уровни, волны...**

Работа мазеров — в общем случае генераторов и усилителей микроволн — основана на стимулированном электромагнитном излучении распределенных в пространстве осцилляторов. В отличие от спонтанного излучения, интенсивность которого равна сумме интенсивностей излучения отдельных независимых осцилляторов, стимулированное излучение является когерентным. Это означает, что волна, излучаемая одной частицей, влияет на излучение другой частицы таким образом, что волны оказываются скоррелированными по фазам. Тогда складываются не интенсивности (квадраты амплитуд), а сами амплитуды волн от отдельных осцилляторов, и излучение нарастает лавинообразно из-за усиления эффектов согласования фаз в поле когерентных волн. Однако электромагнитное поле возрастает не в любой системе осцилляторов: необходима инверсия населенностей энергетических уровней (осцилляторов на верхних энергетических уровнях должно быть больше, чем на нижних, — иначе будут преобладать процессы поглощения).

\* Слово *maser* — аббревиатура английского выражения *microwave amplification by stimulated emission of radiation*.

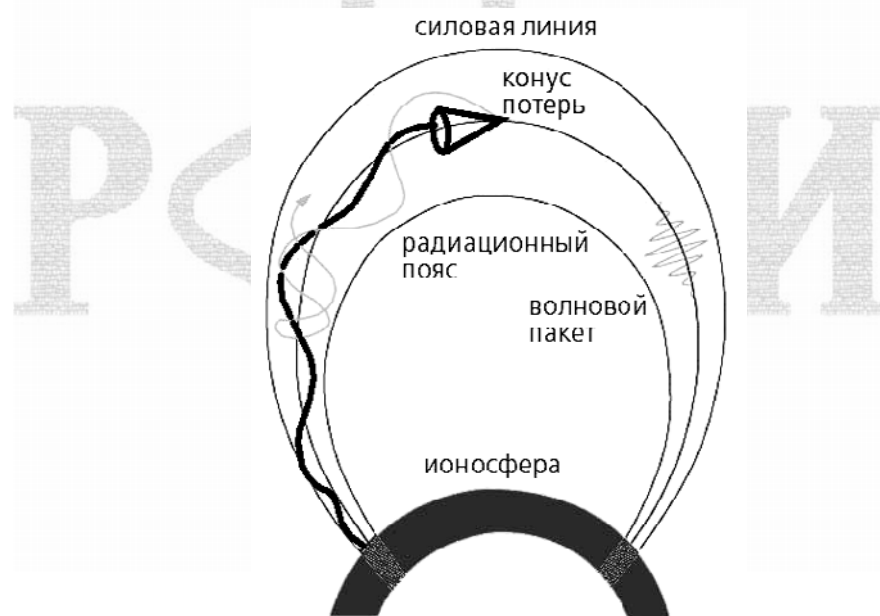
Совокупность осцилляторов с такой инверсией получила название активного вещества. В квантовых генераторах активным веществом служат возбужденные молекулы и атомы; роль энергетических уровней играет дискретный набор их разрешенных энергетических состояний. В классических мазерных системах, например в космических циклотронных мазерах, осцилляторами являются заряженные частицы в магнитном поле; спектр их энергий непрерывен. Как известно, заряженная частица в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного поля, движется по окружности с частотой вращения (циклотронной частотой, или гирочастотой)  $\omega_H = eH/mc$  ( $e$  и  $m$  — заряд и масса частицы,  $H$  — напряженность магнитного поля,  $c$  — скорость света). Заселенность энергетических уровней такими осцилляторами задается распределением частиц по поперечным относительно направления магнитного поля скоростям. Для функционирования космического циклотронного мазера необходимо преобладание осцилляторов с большими поперечными скоростями.

При наличии инверсии в этой системе развивается так называемая циклотронная неустойчивость, которая приводит к лавинообразным переходам заряженных частиц с верхних энергетических уровней на нижние и генерации стимулированного электромагнитного излучения. Но для функционирования мазера, помимо активного вещества, нужно иметь высокодобротную электродинамическую систему, обеспечивающую положительную обратную связь в генераторе. Технически эта связь организуется с помощью зеркал, которые возвращают часть излучения в объем генерации. Родственный по физическим основам лабораторный аналог космических циклотронных мазеров — мазер на циклотронном резонансе — был разработан нижегородскими учеными в начале 60-х годов под руководством А.В. Гапонова-Грехова. Этот электронный прибор предназначался для генерации мощных электромагнитных сигналов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн [1].

Интересно, что ученые столкнулись с эффектами циклотронного мазера еще в одной важной области физики плазмы — касающейся проблем управляемого термоядерного синтеза. В 1960 г. Р.З. Сагдеев и В.Д. Шафранов теоретически предсказали существование циклотронной неустойчивости в плазме, близкой по параметрам к плазме околоземного космического пространства. С точки зрения управляемого термоядерного синтеза циклотронная неустойчивость играла уже вредную (паразитную) роль, препятствуя накоплению горячей плазмы в магнитных ловушках пробочной конфигурации. Именно последний эффект оказался в первую очередь существенным в космическом циклотронном мазере как регулятор плотности потоков заряженных частиц высоких энергий, образующих радиационные пояса Земли.

## Космические атрибуты мазера

В природе, разумеется, циклотронные мазеры появились гораздо раньше, чем ученые создали их лабораторные аналоги. Однако потребность понять, как они функционируют в магнитосфере Земли, возникла лишь с началом эры космических полетов и открытием радиационных поясов Земли [2]. Оказалось, что наша планета окружена кольцом очень горячей плазмы, состоящей из электронов и ионов с энергиями от 10 кэВ до десятков МэВ. Эта область пространства, получившая название радиационных поясов, располагается на расстоянии от 2 до 6 радиусов от центра Земли (напомним, что радиус Земли  $R_0 \approx 6400$  км). Различают внутренний и внешний радиационные пояса, находящиеся, соответственно, на расстоянии 2—3  $R_0$  и 3,5—6  $R_0$ . Сразу возник вопрос: как формируются радиационные пояса и какую опасность они представляют для космических полетов? Этот вопрос находится в тесной связи с функционированием космического циклотронного мазера, поэтому мы начнем с анализа движения частиц в окрестности Земли.



*Рис.1. Схема движения частиц в радиационном поясе. Частицы, скорость которых лежит внутри «конуса потерь» (темная линия), остаются в плотных слоях атмосферы. Частицы со скоростями вне «конуса потерь» (светлая линия со стрелкой) отражаются от «магнитных пробок» и захватываются геомагнитной ловушкой. Картина движения симметрична относительно экваториального сечения магнитной силовой трубки.*

На рис.1 схематически показана траектория движения отдельной частицы вдоль силовой линии магнитного поля Земли. Частица движется по спирали в соответствии с законом сохранения первого адиабатического инварианта

$$\mu = \sin^2\theta \frac{H_L}{H}, \quad (1)$$

где так называемый питч-угол  $\theta = (\mathbf{v} \wedge \mathbf{H})$ ,  $\mathbf{v}$  — скорость частицы, величина магнитного поля  $|\mathbf{H}| = H$  растёт при движении от экватора к основаниям магнитной силовой трубки (магнитным пробкам),  $H = H_L$  — значение  $H$  на экваторе. Как видно из (1), отражение частицы происходит в точке, где  $\theta = \pi/2$  и  $H = \mu^{-1}H_L$ .

Спиралеобразно двигаясь вдоль магнитной силовой линии, заряженные частицы дрейфуют также поперек силовых линий по замкнутой поверхности, опоясывающей Землю, образуя в результате радиационный пояс.

Очень существенно, что точки отражения частиц с малыми поперечными скоростями попадают, согласно (1), в плотные слои атмосферы (высоты  $\leq 200$  км), где быстро теряют энергию в столкновениях с нейтральными частицами и уже не возвращаются в радиационный пояс. Количественно данная область в пространстве параметра  $\mu$  характеризуется конусом потерь, который отвечает неравенству:

$$\mu < \mu_c = H_L/H_0 \equiv \sigma^{-1}, \quad (2)$$

где  $H_0$  — величина  $H$  у поверхности Земли; величина  $\sigma \equiv H_0/H_L$  именуется пробочным соотношением.

Таким образом, магнитным ловушкам пробочной конфигурации органически присуща инверсия населенностей по поперечным скоростям: частицы с малыми поперечными скоростями отсутствуют. Но надо ответить на вопросы: откуда берутся электроны и ионы столь высоких энергий в радиационном поясе? Какие механизмы регулируют концентрацию этих частиц?

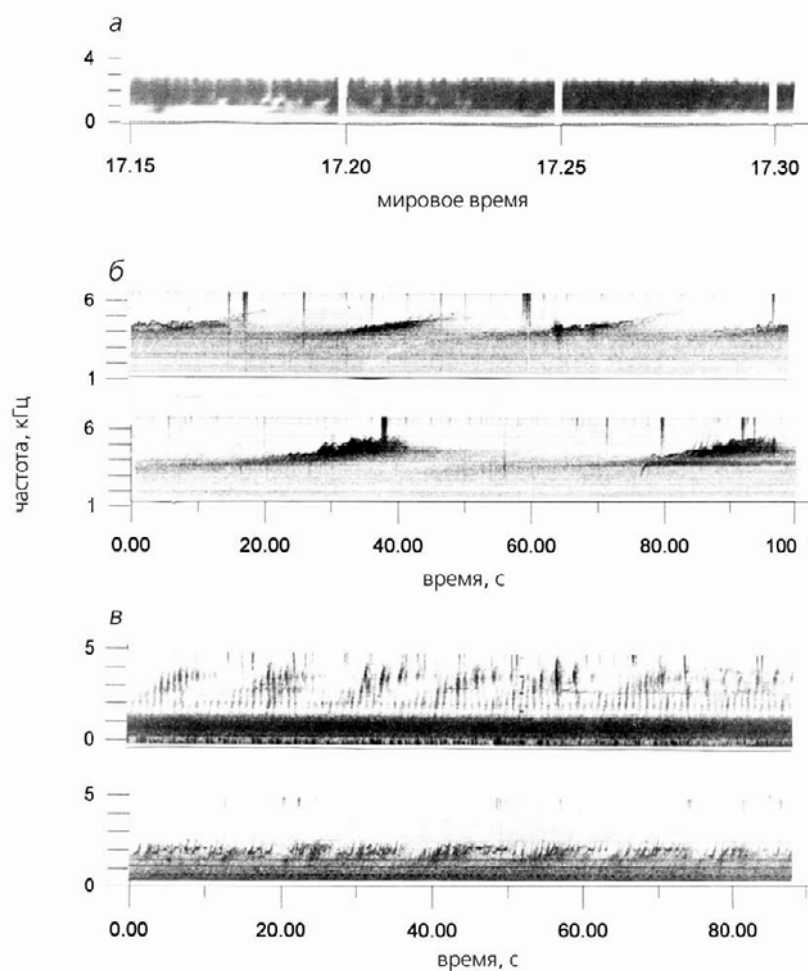
Дело в том, что в околоземном космическом пространстве действуют ускорительные механизмы, которые особенно интенсивны во время магнитных бурь. В первую очередь эти механизмы обусловлены электрическими полями, генерируемыми при взаимодействии солнечного ветра с магнитным полем Земли: поля ускоряют и переносят заряженные частицы во внутренние области магнитосферы, формируя радиационный пояс. Удивительным оказался тот факт, что полная концентрация частиц (как электронов, так и ионов) в радиационном поясе переставала расти, достигнув определенного значения, хотя ускорительные механизмы продолжали действовать. Это открытие не только породило фундаментальную физическую проблему — оно имеет и практическое значение. Обнаруженный эффект принципиально важен для безопасности космических полетов на околоземных орбитах, и для него решающее значение имеют процессы, происходящие в космических циклотронных мазерах. Но прежде

чем переходить к анализу работы последних, остановимся еще на одной группе экспериментальных фактов.

### **Говорит ближний космос**

При измерениях электромагнитного излучения в звуковом диапазоне частот ( $0,1 \div 30$  кГц) были обнаружены сигналы естественного происхождения с аномально большой интенсивностью. Сигналы такой амплитуды не удалось связать с какими-либо известными источниками спонтанного излучения. По аналогии с привычной аббревиатурой СВЧ их называли КНЧ (крайне низкочастотные,  $f \sim 0,1 \div 3$  кГц) и ОНЧ (очень низкочастотные,  $f \sim 3 \div 30$  кГц) излучения. Они повторялись регулярно и были тесно связаны с магнитными бурями. Продолжительность КНЧ и ОНЧ излучений достигала нескольких часов, а частотные динамические спектры демонстрировали большое разнообразие. На рис.2 приведены взятые из [3] примеры спектрограмм наиболее типичных сигналов: шипение (шумовое излучение), квазипериодическое излучение с периодами модуляции интенсивности  $10 \div 10^2$  с и дискретные эмиссии, представляющие собой последовательности узкополосных сигналов с растущей частотой и периодом следования  $0,1 \div 1$  с. В настоящее время ясно, что эти сигналы и динамика радиационного пояса Земли тесно связаны между собой. По существу КНЧ и ОНЧ излучения разных типов имеют общее происхождение как электромагнитные волны, которые генерируются в радиационном поясе благодаря мазерному механизму, а различные динамические спектры излучений суть следствие различных режимов генерации волн в этом мазере. КНЧ и ОНЧ излучения генерируются электронной компонентой радиационного пояса. В то же время сходные по динамическим спектрам сигналы были обнаружены в диапазоне так называемых короткопериодных геомагнитных пульсаций (частоты  $f \sim 0,1 \div 10$  Гц). Эти сигналы возбуждаются ионной (в основном протонной) компонентой радиационного пояса.

Следует заметить, что электродинамическая система рассматриваемого магнитосферного циклотронного мазера существенно отличается от его лабораторного аналога. Ведь наряду с радиационным поясом магнитосфера Земли заполнена гораздо более плотной холодной компонентой плазмы. Так, если концентрация собственно частиц радиационного пояса составляет  $n_{рп} 10^{-3} \div 10^{-1} \text{ см}^{-3}$ , то плотность холодной компоненты достигает значений  $n_{х} 10^2 \div 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Эта плазма существенно меняет характеристики участвующих во взаимодействии электромагнитных волн.



*Рис. 2. Наиболее типичные спектрограммы КНЧ—ОНЧ сигналов, генерируемых в радиационном поясе Земли (степень почернения на плоскости частота—время характеризует интенсивность сигналов): а — хиссы (шумовые излучения); б — квазипериодические излучения; в — последовательность дискретных сигналов типа так называемых хордов, которые, как правило, регистрируются на фоне шумовых и квазипериодических излучений.*

Фазовая скорость таких волн становится много меньше скорости света, частота их — меньше гирочастоты соответствующих частиц (электронов или ионов), а магнитная компонента (по своему энергетическому вкладу) — много больше электрической. В ОНЧ—КНЧ диапазоне они эффективно взаимодействуют с электронами и получили название свистовых волн, или геликонов. В диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций это — альвеновские волны, которые эффективно взаимодействуют с ионами радиационных поясов. Важная особенность обоих типов волн состоит в том, что их групповая скорость практически мало отклоняется от направления магнитного поля. Итак, электродинамической системой в космическом циклотронном мазере, который реализуется в магнитосферах планет и звезд, является заполненная холодной плазмой магнитная силовая трубка. Эта трубка упирается торцами в ионосферу в противоположных полушариях (области ионосферы, соединенные одной силовой линией магнитного поля, называются магнитоспряженными — см. рис.1). Данные облас-

ти ионосферы служат зеркалами для свистовых и альвеновских волн, а плазма радиационного пояса выступает в качестве активного вещества.

### ***Немного о теории***

Основы теории космического циклотронного мазера были заложены в работах одного из авторов данной статьи и его коллег (см. монографию [4]) и получили дальнейшее развитие при выполнении грантов РФФИ. Действие подобного мазера основано на циклотронном резонансе вращающегося в магнитном поле электрона с волной, когда частота вращения  $\omega_H$  совпадает с частотой волны  $\omega'$  в системе координат, движущейся вместе с электроном вдоль магнитного поля.

В лабораторной системе координат эта частота равна

$$\omega' = \omega_H + (\mathbf{k}\mathbf{v}_{\parallel}), \quad (3)$$

где  $\mathbf{k}$  — волновой вектор,  $\mathbf{v}_{\parallel}$  — компонента скорости электрона вдоль магнитного поля.

Инверсия населенностей по поперечным скоростям частиц радиационного пояса дает начало циклотронной неустойчивости, в результате которой малые возмущения электромагнитного поля на частоте (3) начинают экспоненциально нарастать. В пределах длины магнитной силовой трубки неустойчивость носит конвективный характер: волновой пакет свистовых (или альвеновских) волн распространяется вдоль магнитной силовой линии, усиливаясь из-за эффектов циклотронной неустойчивости в экваториальной области, где сосредоточены частицы радиационного пояса. Положительная обратная связь обеспечивается частичным отражением волн от ионосферных зеркал. Порог генерации достигается при балансе усиления волн и потерь, который записывается в виде

$$\Gamma = |\ln R|, \quad (4)$$

где потери характеризует  $R$  — коэффициент отражения волн от ионосферы, а усиление —  $\Gamma = \gamma\tau_g$  — логарифмическое усиление волн при однократном прохождении радиационного пояса [4]. Здесь

$$\gamma = \frac{n_{\text{РП}}}{n_{\text{Х}}} \omega_{\text{HL}}$$

— характерный инкремент циклотронной неустойчивости,  $\omega_{\text{HL}}$  — гирочастота в экваториальном сечении магнитной силовой трубки,  $\tau_g$  — время группового распространения волн между зеркалами. Порог преодолевается, когда начинают действовать источники частиц в радиационном поясе, приводящие к росту  $n_{\text{РП}}$ ; после этого интенсивность волн стремительно нараста-



ет. Время нарастания определяется величиной, обратной инкременту неустойчивости  $\gamma$ , и в случае электронного радиационного пояса составляет доли секунд. Излучая, частицы теряют свою поперечную энергию, которая частично переходит в энергию продольного движения. Вследствие этого уменьшается питч-угол излучающих частиц  $\theta$ , из-за чего они начинают поступать в конус потерь — тем быстрее, чем интенсивнее поставляются новые частицы в радиационный пояс.

В итоге концентрация частиц там стабилизируется в среднем на уровне, соответствующем порогу генерации (4). Излишки частиц высоких энергий высыпаются в плотные слои атмосферы, обеспечивая тем самым передачу энергии от радиационного пояса верхней атмосфере. Какова же реальная динамика волн и частиц в космическом циклотронном мазере?

Наличие фоновой холодной плазмы не единственное отличие мазера, функционирующего в магнитосферах планет и звезд, от его лабораторного аналога. К нему добавляются сильная неоднородность магнитного поля, постоянно действующие источники, которые поставляют частицы в широком интервале энергий и питч-углов. Эти факторы определяют и особенности математического описания процессов. Широкое применение здесь получила известная в физике плазмы квазилинейная теория взаимодействия волн и частиц. Так, она достаточно хорошо подходит для описания взаимодействия широкополосных КНЧ и ОНЧ излучений с электронами радиационного пояса. В нашем случае эта теория учитывает два основных физических процесса: во-первых, диффузионное изменение питч-угла частицы  $\theta$  и ее попадание по данной причине в конус потерь и, во-вторых, самосогласованное изменение разности населенностей, влияющее на генерацию волн. Простейший вариант оказывается близким к двухуровневому приближению в теории оптических квантовых генераторов. Таким образом удалось объяснить целый ряд наблюдательных фактов, касающихся электронных радиационных поясов и КНЧ—ОНЧ излучений [4]. Среди них — стационарные и квазипериодические режимы высыпаний электронов радиационных поясов в ионосферу и сопутствующие им КНЧ—ОНЧ шипения (рис. 2,а,б). Остановимся на них чуть подробнее.

### ***Полярные сияния и другие всплески***

О полярных сияниях в виде пульсирующих пятен на небе авроральных широт слышали, наверно, все. Экспериментальное исследование этого интересного явления свидетельствует: оптические пульсации вызываются высыпаниями электронов высоких энергий ( $\sim 10$ — $40$  кэВ) в верхнюю атмосферу. Географически они тесно привязаны к основанию вытянутого вдоль магнитного поля волокна с повышенной плотностью холодной плазмы. Пульсации непосредственно коррелируют со всплесками электромагнитных КНЧ излучений. Детальный теорети-



ческий анализ показал, что весь комплекс явлений обязан своим происхождением функционированию космического циклотронного мазера внутри волокна. Последнее играет роль высокочастотной электродинамической замедляющей системы, резко усиливающей эффекты циклотронного взаимодействия электронов радиационных поясов со свистовыми волнами. Источником активного вещества здесь служат электроны, которые ускоряются во время магнитных бурь на ночной стороне магнитосферы и затем в процессе магнитного дрейфа на утреннюю сторону пересекают волокна плотной холодной плазмы. Схема такого генератора (его естественно назвать проточным циклотронным мазером), изображена на рис.3 [5]. Пульсации высыпаний электронов, вызывающие всплески оптического свечения атмосферы, обусловлены автоколебательным режимом работы мазера. Расчет этого режима надо вести уже в рамках более сложной модели, чтобы учесть нелинейный рост числа осцилляторов, участвующих в генерации волн [5].

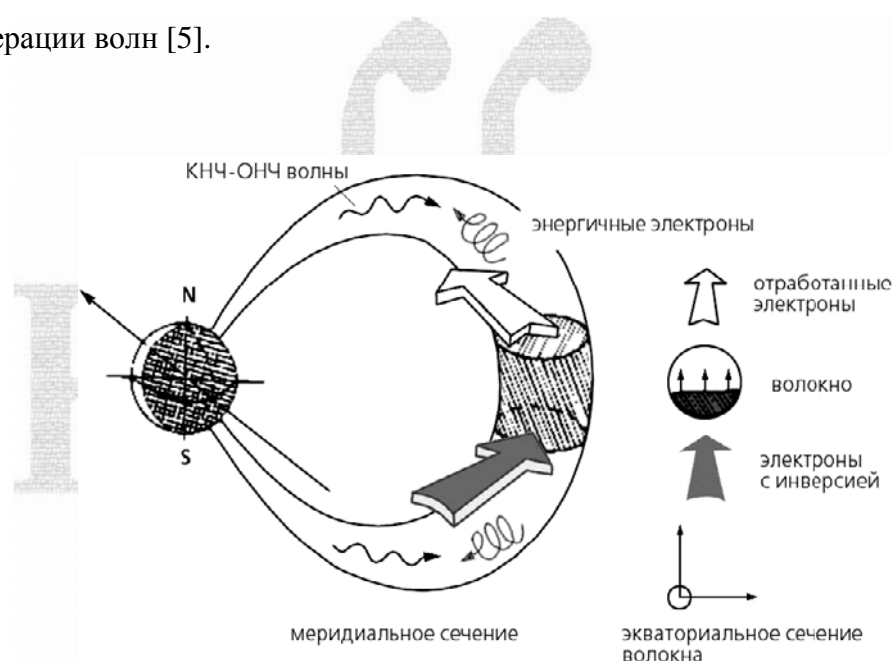


Рис. 3. Схема работы проточного космического циклотронного мазера. Электроны высоких энергий с инверсией населенностей входят в процессе магнитного дрейфа в область генерации (внутри волокна повышенной плотности). «Отработанные» электроны (без инверсии) выходят через противоположную стенку волокна.

До сих пор мы полагали, что прозрачность ионосферных зеркал остается постоянной. На самом деле под действием потоков высыпающихся через «конус потерь» частиц высоких энергий происходит дополнительная ионизация ионосферы и ее прозрачность изменяется. Роль подобных эффектов особенно велика в случае ионного (протонного) космического циклотронного мазера, поскольку длина возбуждаемых в нем волн сравнима с толщиной ионосферы. При этом коэффициент отражения альвеновских волн от ионосферы  $R(\omega)$  как функция частоты носит ярко выраженный резонансный характер: на рис. 4 приведен пример

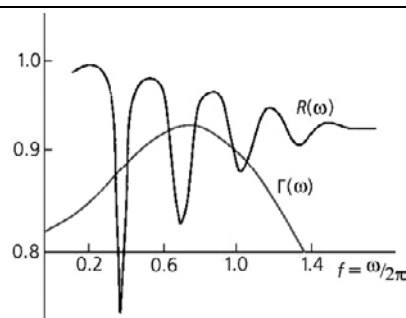


Рис. 4. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения альвеновских волн  $R(\omega)$  от ионосферы и логарифмического усиления волн  $\Gamma(\omega)$  при однократном прохождении радиационного пояса в протонном мазере (мгновенная картина).

такой зависимости для средних параметров ионосферы [4]. Там же изображена линия усиления  $\Gamma(\omega)=\gamma\tau_g$  для протонного мазера.

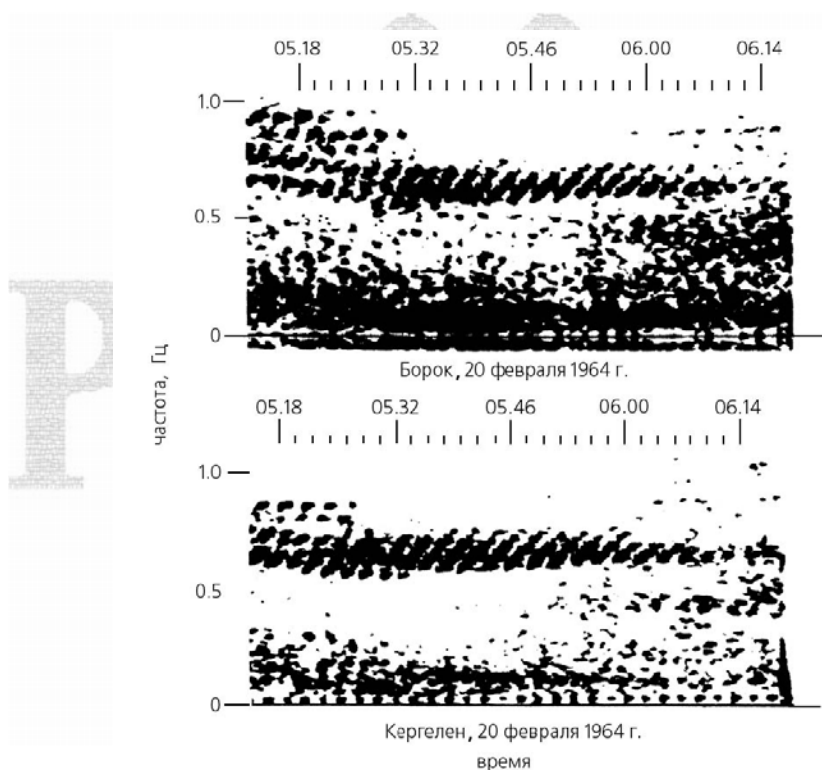


Рис. 5. Примеры динамических спектров в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций ( $Pc 1$ ), которые удается объяснить на основе автоколебательного режима генерации в протонном мазере. Борок (Ярославская обл.) и Кергелен (*Kerguelen* — остров в южной части Индийского океана, владение Франции) — названия наблюдательных пунктов. Заметим, что эти пункты находятся в противоположных полушариях в окрестности одной и той же силовой линии магнитного поля (как говорят, они магнитно сопряжены).

Генерация будет происходить в узкой полосе вблизи частоты, где полное усиление  $\Gamma(\omega) - |\ln R(\omega)|$  максимально. Возникающая в процессе развития циклотронной неустойчивости до-

полнительная ионизация ионосферы приводит к смещению кривой  $R(\omega)$  относительно линии  $\Gamma(\omega)$ , а следовательно, к перестройке частоты генерации  $\omega(t)$ .

Как видно из рис.4, при таком дрейфе  $R(\omega, t)$  относительно  $\Gamma(\omega)$  возможна ситуация, когда величина  $\Gamma - |\ln R|$  по мере возбуждения волн в космическом циклотронном мазере не уменьшается, а растет, пока максимум  $\Gamma(\omega)$  в процессе дрейфа кривой не встретится с ближайшим максимумом  $R(\omega, t)$ . Когда полное усиление мазера ведет себя подобным образом, последний переходит в автоколебательный режим пиковой генерации. С данным режимом удастся связать широкий класс наблюдаемых короткопериодных геомагнитных пульсаций типа «жемчужины» в диапазоне Рс 1 (0,1—5 Гц — см. рис. 5).

### **О недосказанном**

Мы видим, что разработанная теория функционирования космического циклотронного мазера в магнитосфере Земли находит убедительное экспериментальное подтверждение. Удастся количественно объяснить самые разные типы электромагнитных излучений, которые приходят к нам из ближнего космоса. Космический циклотронный мазер играет ключевую роль в понимании динамики радиационного пояса Земли и количественной интерпретации процессов высыпания частиц высоких энергий в верхнюю атмосферу. Аналогичные процессы наблюдаются и в радиационных поясах других планет.

В то же время остаются очень важные и не понятые до конца проблемы объяснения тонкой структуры излучения. Новые подходы к их решению предложены в работах [6—7]; они опираются на то, что в процессе развития циклотронной неустойчивости деформируется функция распределения электронов радиационных поясов, возникают движущиеся ступени — своеобразные ударные волны в фазовом пространстве скоростей. При этом возможны новые режимы генерации волн в космическом мазере, способные объяснить возникновение дискретных КНЧ—ОНЧ излучений, пример которых показан на рис. 2,в.

За пределами данной статьи остались и чрезвычайно интересные новые приложения теории к таким объектам, как активные области в солнечной короне и атмосферах звезд. Условия существования плотной плазмы, которые там реализуются, радикально меняют динамику мазера, приводя к возникновению взрывных явлений в генерации волн и обмену энергией между горячей и холодной компонентами плазмы [8]. Но об этом — как-нибудь в другой раз.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1 Гапонов-Грехов А.В., Петелин М.И. Мазеры на циклотронном резонансе // Наука и человечество. М., 1980. С.283—290.

- 2 *Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М., 1968.*
- 3 *Helliwell R.A. Whistlers and Related Ionospheric Phenomena. Stanford, 1965.*
- 4 *Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. Альвеновские мазеры. Горький, 1986.*
- 5 *Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Y. // Journal of Geophysical Research. 1994. V.99. P.5831—5841.*
- 6 *Trakhtengerts V.Y. // Journal of Geophysical Research. 1995. V.100. P.17205—17210.*
- 7 *Демехов А.Г., Трахтенгерц В.Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т.44. №1—2. С.111—126.*
- 8 *Трахтенгерц В.Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т.39. С.699—712.*

