

РЕЗОНАНСНЫЙ ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВОЙ РАЗРЯД В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Г.А. Марков, Ю.В. Чугунов

Экспериментально показаны возможности формирования в ионосфере Земли волнового разряда в свистовом диапазоне частот. Обсуждаются особенности его структуры и динамики. Приведены данные о возмущениях, стимулируемых модулированным разрядом, в околоземном пространстве. Демонстрируются возможности использования такого разряда в качестве НЧ плазменной антенны.

Введение

Активное волновое воздействие на ионосферу Земли является в настоящее время эффективным средством изучения нелинейных ионосферных явлений и определения возможностей их технологического использования. Особенно сильные воздействия возможны в резонансных областях частот $\omega_{В1} \leq \omega \leq \omega_{Ве}$, где $\omega_{Ве}$ и $\omega_{В1}$ – гирочастоты электронов и ионов, соответственно. Следует, прежде всего, отметить, что в условиях нижней ионосферы $h \leq 150$ км уже при напряженностях электрических полей $E_{\sim} 10$ В/см возможно возбуждение резонансных ВЧ-разрядов бортовыми радиоисточниками летательных аппаратов.

Ионизационное самовоздействие полей электромагнитных источников в указанном свистовом диапазоне частот допускает совместную концентрацию ионизирующего излучения и образующейся плазмы [1–6]. В результате такого самовоздействия наблюдается формирование плазменно-волновых каналов, локализующих энергию излучения и ее выделение в узкой магнитной силовой трубке. Образующаяся при разряде плазменная неоднородность автоматически [7] подогласовывает короткую возбуждающую антенну с генератором накачки и окружающей средой, что увеличивает эффективность передачи энергии от источника в плазму силовой трубке. В ночной ионосфере возбуждаемый на высотах $h \geq 150$ км бортовым радиоисточником плазменно-волновой канал может быть источником мощных потоков горячих частиц вдоль геомагнитного поля.

Для экспериментальной проверки высказанных предположений и исследования локальных и крупномасштабных возмущений параметров ионосферной и магнитосферной плазмы, стимулированных радиоизлучением с борта летательного аппарата, был предложен и реализован ионосферный эксперимент «Активный шнур». Основным отличием указанного эксперимента от

других экспериментов, в которых также использовалось мощное радиоизлучение, являются достаточно большие амплитуды ближних полей, способные вызвать электрический разряд и существенно изменить плотность плазмы вблизи летательного аппарата. Кроме того, особенностью эксперимента «Активный шнур» является выбор резонансного частотного диапазона $\omega_{нр}, \nu_e < \omega_{рф} < \omega < \omega_{ве}$, где $\omega_{нр}$ – частота нижнегибридного резонанса, ν_e – частота столкновений электронов, $\omega_{рф}$ – плазменная частота фоновой плазмы. В указанном диапазоне легко реализовать усиление поля в фокусе резонансного конуса [1,3,5] и наблюдать ионизационное самоканалирование плазменных [1–3] и свистовых [4,6] волн. Еще одна особенность – сравнительно долгое время реализации эксперимента в одной и той же силовой трубке (~3 мин).

Основные результаты лабораторного моделирования эксперимента «Активный шнур» приведены в работах [1–8]. Стационарная структура разряда (в дальнейшем мы будем называть его плазменно-волновым разрядом), возбуждаемого дипольной антенной из двух колец, ориентированной вдоль внешнего магнитного поля и оси симметрии установки, показана на фотографии рис. 1, на которой видны две отличающиеся области разряда. Первая область локализована вблизи антенны и представляет собой конусный объем, основание которого лежит в плоскости источника (антенны), а вершина – на оси плазменной камеры. На образующих конуса достигаются максимумы концентрации разрядной плазмы и амплитуды электрического поля [3]. Угол раствора конуса α при умеренных мощностях накачки соответствует линейному дисперсионному уравнению для плазменных волн в данном диапазоне частот $\text{tg}\alpha = (\epsilon_{\perp} / |\epsilon_{\parallel}|)^{1/2}$, где α – угол между групповой скоростью плазменных волн и внешним магнитным полем, ϵ_{\perp} и ϵ_{\parallel} – поперечная и продольная компоненты тензора диэлектрической проницаемости плазмы. Это означает, что в первой области разряд возбуждается и поддерживается «ближним» электромагнитным полем антенны и полем пучка плазменных волн, возбуждаемых антенной. Вершина конуса соответствует геометрическому фокусу пучка плазменных волн при данной геометрии. После прохождения фокуса структура разряда качественным образом меняется. Во второй области разряд представляет собой сильно вытянутый вдоль магнитного поля (вблизи оси системы) плазменный шнур. Электрическое поле и концентрация разрядной плазмы локализованы внутри шнура. Концентрация электронов в шнуре может превышать концентрацию электронов фоновой плазмы на несколько порядков, а температура электронов разрядной плазмы – порядка энергии ионизации. Эти величины, а также длина шнура зависят от мощности генератора накачки. Поперечный размер (радиус) шнура зависит от величины внешнего магнитного поля и давления, но всегда мал по сравнению с радиусом камеры. В этой области реализуется разряд в виде самосогласованного плазменно-волнового канала, оторванного от стенок плазменной камеры. Продольный размер канала существенно превышает радиус плазменной камеры и при давлениях $p < 10^{-2}$ Торр определяется продольным размером этой камеры. Возможные структуры такого разряда были изучены в лабораторных условиях в широком интервале давлений,



Рис. 1. Структура ВЧ-разряда, формируемого в результате ионизационного самоканалирования плазменных волн в продольном магнитном поле $B_0 = 500$ Гс при $p = 2 \times 10^{-2}$ Торр, $f = 200$ МГц, $V_0 = 50$ В; z – расстояние от дипольного источника, формирующего разряд, r_a – радиус возбуждающих колец источника

параметров фоновой плазмы, мощности генератора накачки и геометрии антенной системы [2,3]. Следует сразу отметить, что усложнение геометрии антенной системы (например, применение квадрупольных конфигураций) или работа генератора в сильно нелинейном режиме могут приводить к более сложным стационарным конфигурациям плазменно-волнового разряда [2]. Однако сильно вытянутые вдоль магнитного поля неоднородности разрядной плазмы реализуются и в этих более сложных конфигурациях. Из динамических режимов следует отметить режим модуляции или «мигания» разряда, который осуществляется путем амплитудной модуляции сигнала генератора накачки низкой частотой. Динамика разрядной плазмы характеризуется в этом случае [5] периодическим изменением параметров плазмы в канале с частотой модуляции, появлением сильного диамагнитного сигнала и генерацией ускоренных электронов и ионов в широком интервале энергий.

Лабораторное моделирование указанных выше разрядных явлений применительно к условиям нижней ионосферы на высотах $h \sim (90 \div 150)$ км показало возможность создания на этих высотах сильных локальных возмущений в виде плазменных неоднородностей с регулируемыми параметрами, вытянутых вдоль геомагнитного поля. Резонансный плазменно-волновой разряд возбуждается в ближнем электромагнитном поле бортовой дипольной антенны, легко управляется и характеризуется оптимальным вводом энергии в окружающую плазму. Лабораторное моделирование [8] и расчеты указанных процессов позволяют сделать оценки основных параметров возбуждаемой плазменной неоднородности в ионосфере [9]. Существенную роль в формировании плазменной неоднородности могут играть диффузионные процессы. Схема ионосферного эксперимента и структура формируемой плазменной неоднородности показана на рис. 2.

Длина собственно разрядной части L_d определяется масштабом затухания плазменных волн, формирующих разряд, $L_d \sim \omega \lambda_{\parallel} / v_e$. Здесь $\lambda_{\parallel} = 2\pi / k_{\parallel}$, k_{\parallel} – компонента волнового вектора вдоль внешнего магнитного поля \mathbf{B}_0 . Продольный масштаб диффузионной части неоднородности определяется соотношением $L_D \sim (D_{\parallel} / \nu_a)^{1/2}$, где $D_{\parallel} = \epsilon_e / (m v_e)$ – коэффициент униполярной диффузии электронов вдоль \mathbf{B}_0 , ϵ_e – энергия электронов, e и m – заряд и масса электрона, ν_a – частота рекомбинации частиц (в нижней ионосфере это частота прилипания электронов к атомам кислорода). Поперечный масштаб плазменной неоднородности L_{\perp} зависит от перпендикулярной вектору \mathbf{B}_0 компоненты скорости аппарата, структуры

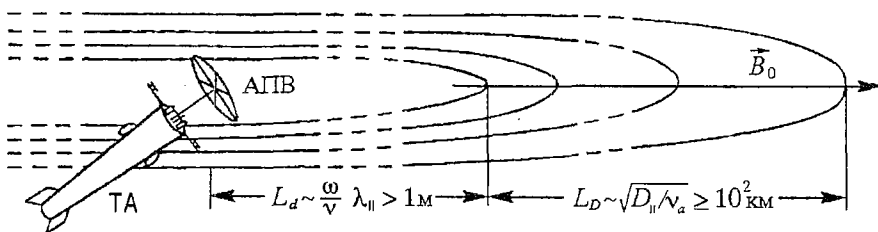


Рис. 2. Схема ионосферного эксперимента с условным изображением метеоракеты с антенной плазменных волн (АПВ), диагностическими приборами в головной части ракеты и телеметрическими антеннами (ТА) по бокам ракеты. Формируемая в результате разряда плазменная неоднородность изображена линиями равной концентрации

ближнего поля, возбуждающей разряд антенны и диффузионных процессов. В ракетных экспериментах [10–14] $L_{\perp} \sim 100$ м.

В таблицу сведены расчетные данные по основным параметрам плазменной неоднородности в зависимости от высоты полета при частоте генератора накачки 480 кГц и подводимой мощности $W \sim 1$ кВт, из которых видно, что наиболее благоприятные условия для реализации достаточно протяженных (продольные масштабы разрядной части L_d больше 1 км) и интенсивных (по возмущению концентрации и температуры) плазменных неоднородностей осуществляются на высотах, больших 130 км. Причем диффузионная часть неоднородности сильно возрастает с увеличением высоты из-за роста длины свободного пробега электронов $l_e(h)$ [15]. Следует отметить, что подобные возмущения ионосферной плазмы можно создавать и на больших высотах, если в спутниковых экспериментах использовать напуск газа в область излучающей антенны.

Таблица

Высота над поверхностью Земли h (км)	100	120	140	160
Длина разрядной части шнура L_d (м)	15	150	1500	7500
Усредненная плотность плазмы в разрядной части шнура (см^{-3})	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$\sim 10^6$
Длина диффузионной части шнура L_D (м)	10	200	10^4	$2 \cdot 10^5$

Известно, что магнитосфера Земли, особенно в высоких широтах, представляет собой сильно неравновесную систему, в которой происходят различного рода взаимодействия электромагнитных волн и частиц, направляемых геомагнитным дипольным полем. Одна из распространенных точек зрения состоит в том, что магнитосфера есть распределенный альвеновский мазер, в котором «рабочее вещество» представляет собой энергичную часть электронов при анизотропной функции распределения частиц по скоростям (например, частицы радиационных поясов), а резонаторная система состоит из силовых трубок геомагнитного поля, заполненных «холодными» частицами. Возбуждаемые электромагнитные моды есть свистовые или альвеновские волны. Они направляются геомагнитным полем и (или) неоднородным распределением концентрации «холодных» частиц (волноводные дакты) и испытывают отражение в сопряженных точках в основаниях силовой трубки геомагнитного поля, иногда на ионосферных высотах. Степень возбуждения такой системы характеризует, прежде всего, уровень высыпающихся энергичных частиц из силовой трубки геомагнитного поля и уровень шумовых электромагнитных излучений в ней. Следует ожидать, что изменение концентрации частиц в основании силовой трубки и натекание надтепловых частиц плазменно-волнового разряда в ее объем могут существенно изменить уровень взаимодействия волн и частиц в силовой трубке геомагнитного поля, в основании которой возбуждается разряд. Прежде всего изменяются условия возбуждения, каналирования и отражения свистовых и альвеновских электромагнитных волн, захваченных в возмущенную разрядом трубку. При этом могут измениться потоки высыпающихся из такой трубки заряженных частиц. Модуляция потоков частиц разрядом означает возбуждение переменных токов с масштабами возмущенной трубки.

Важной физической задачей, которая также может моделироваться в

подобных экспериментах, является создание новых типов низкочастотных излучателей (плазменных антенн). Первый вариант создания таких антенн связан с увеличением эффективности излучения дипольной антенны на частоте накачки при возбуждении вокруг нее плазменно-волнового разряда или, другими словами, при помещении антенны в достаточно плотный и протяженный плазменный объем. Это может быть реализовано как в пассивном, так и в активном режимах. В пассивном режиме происходит увеличение дипольного момента из-за эффективного увеличения геометрических размеров излучателя. Активный способ основан на предположении, что зажигание плазменно-волнового разряда в ближнем поле дипольной антенны в большинстве случаев приводит к дополнительному согласованию антенны с выходом генератора, то есть к достаточно эффективному вводу электромагнитной энергии в плазменный объем [7]. В дипольной конфигурации это означает, что, как правило, растет и излучаемая из этого объема электромагнитная мощность на частоте накачки. Кроме того, из-за возбуждения поверхностных волн в плазменной неоднородности больших размеров возможно существенное изменение диаграммы направленности и коэффициента усиления антенны. Второй вариант связан с возможностями переизлучения из плазменного объема сигнала с частотой модуляции сигнала накачки, то есть создания на ионосферных высотах низкочастотной активной плазменной антенны, достаточно эффективно излучающей электромагнитные сигналы в интервале частот 10÷1000 Гц.

1. Натурный эксперимент «Активный шнур»

Эксперимент «Активный шнур» был реализован в шести ракетных пусках. Для эксперимента были использованы метеоракеты МР-12 с блоком научной аппаратуры (БНА). БНА располагался в головной части ракеты и содержал аппаратуру воздействия на параметры окружающей среды и аппаратуру диагностики возмущений параметров. К аппаратуре воздействия относились ВЧ-генератор с блоками питания и автоматики и телескопическая антенна для возбуждения плазменных волн. Для усиления воздействия использовались взрывы пиропатронов и дополнительный напуск газа в область возбуждающей разряд антенны. Диагностика возмущений осуществлялась с помощью автоколебательного и ленгмюровских зондов, счетчиков энергичных частиц разных диапазонов энергий, бортового приемника НЧ-колебаний электромагнитного поля, анализатора массового состава заряженных частиц, датчиков величины геомагнитного поля и фотометра. На рис. 2 показано схематичное расположение датчиков научных приборов на ракете во время эксперимента.

ВЧ-генератор был собран по ключевой мостовой схеме и имел следующие параметры: рабочая частота $f=480$ кГц, амплитуда выходного напряжения $V_0 \geq 1$ кВ, номинальная мощность на согласованную нагрузку ~ 1 кВт. Генератор работал в телеграфном режиме амплитудной модуляции по специальной циклограмме. Частоты модуляции f_1 и f_2 менялись от эксперимента к эксперименту, но всегда удовлетворяли условию $f_1, f_2 < 1$ кГц.

В качестве ВЧ-источника в экспериментах использовались двухэлектродные антенны плазменных волн (АПВ), которые разворачивались над головной частью ракеты из-за ее вращения после схода створок обтекателя ($h \geq 50$ км) и выдвигения вдоль оси ракеты диэлектрической штанги-держателя антенны ($l \geq 2$ м). Для экспериментов, выполненных в северной части Норвежского моря (1986 [12] и 1989 [11,13]) с борта исследовательского судна «Профессор Зубов», антенна была выбрана в виде проволочного кольца диаметром 2 м с металлическими спицами-

растяжками, поднятого штангой–держателем на 2 м над ракетой, и металлического штыря ($l_* \sim 25$ см), соединенного с корпусом ракеты. ВЧ–напряжение от генератора подводилось между корпусом ракеты и проволочным кольцом. Металлический штырь предназначался для облегчения зажигания разряда и экранирования датчиков диагностической аппаратуры, расположенных на верхней плате БНА, от воздействия ВЧ–поля. Величины подводимого ВЧ–напряжения, тока через антенну и сдвига фаз между током и напряжением контролировались по специальному телеметрическому каналу.

В экспериментах, выполненных на полигоне Капустин Яр (48° N, 70° E) в 1986 году [10], использовалась такая же АПВ с проволочным и штыревым электродами, а в 1991 году [14] была использована антенна в виде двух полуцилиндров из металлической сетки. Сетка диаметром 2 м и высотой образующей 1.2 м распускалась после схода створок обтекателей и выдвижения штанги–держателя и приобретала цилиндрическую поверхность из–за вращения ракеты. К полуцилиндрам подводилось ВЧ–напряжение амплитудой $V_0 \sim 1.5$ кВ.

Все пуски ракет были выполнены в ночное либо в вечернее время, когда ионосферная плазма на высотах проведения экспериментов ($h \leq 150$ км) была прозрачна для излучения, формируемого АПВ на рабочей частоте 480 кГц. Ракеты запускались под углом $\sim 85^\circ$ к горизонту при азимуте $\sim 108^\circ$ в средних широтах и в южном направлении геомагнитного меридиана в полярной области. В экспериментах в средних широтах использовались возвратно–наклонное зондирование плазменной неоднородности в диапазоне 18÷23 МГц, пассивный прием электромагнитного излучения на частоте 480 кГц и частотах модуляции f_1 и f_2 , телевизионное сопровождение на начальном участке трассы. Эксперименты в Норвежском море проводились синхронизованно с пролетом спутников «Ореол–3» (1986) и «Ионозонд» (1989).

2. Результаты экспериментов

2.1. Возбуждение, динамика и основные параметры плазменно–волнового канала. Пуски ракет в средних широтах проводились в условиях спокойной ионосферы, когда высотное распределение ионосферной плазмы соответствовало обычному для ночного времени на данных широтах. Основным результатом экспериментов 1986 года [10] было подтверждение возможности создания в ионосфере вытянутой вдоль геомагнитного поля резкой плазменной неоднородности и формирования модулированных разрядом потоков ускоренных частиц. На рис. 3 приведены графики, отражающие изменения потоков быстрых электронов $I_e(t)$ с энергией $\mathcal{E}_e \geq 2.2$ кэВ относительно уровня фона I_b (кривая 1) и концентрация плазмы $N(t)$ (кривая 2) в окрестности ракеты во время полета. Там же проставлены контрольные высоты h и приведена циклограмма работы ВЧ–генератора (кривая 3), в которой верхний уровень соответствовал модуляции с частотой $f_1 = 960$ Гц, средний – модуляции с частотой $f_2 = 240$ Гц, нижний уровень означал паузу в работе генератора. Полное раскрытие антенны произошло на 128 секунде (из–за задержки схода одной из створок обтекателя) и сопровождалось, по–видимому, кратковременным замыканием выхода генератора на корпус, что привело к срыву генерации и образованию в результате дугового разряда газового облака. Пик $N(t)$ при $t = 134$ с обусловлен ионизацией этого газа полем антенны. После раскрытия антенны разряд перешел в нормальную фазу в виде вытянутой вдоль геомагнитного поля плазменной неоднородности. Концентрация в разряде четко отслеживала циклограмму работы генератора, а ее величина достигала значений 10^7 см $^{-3}$. На 218 секунде полета на высоте $h = 140$ км был произведен

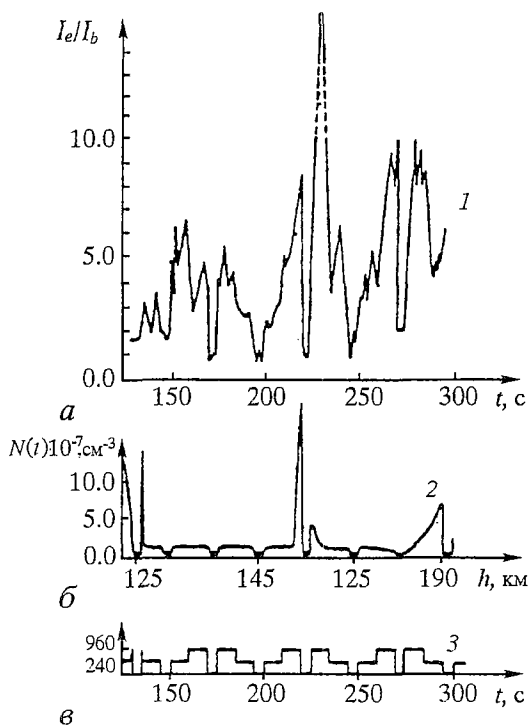


Рис. 3. Результаты эксперимента в средних широтах: а – кривая возмущения потоков электронов $I_e(t)$ с энергией $\epsilon_e \geq 2.2$ кэВ относительно фонового уровня I_b ; б – возмущения плотности плазмы $N(t)$ вблизи головной части ракеты при возбуждении ВЧ-разряда, модулированного в соответствии с циклограммой (в) на частотах 960 Гц и 240 Гц, t – время полета, h – высота подъема

могут формироваться в протяженных волновых каналах за счет захвата и ускорения частиц полем косых ленгмюровских волн. Поэтому при включении генератора после перерыва на 225 секунде плотность энергичных электронов возрастала в несколько раз. Величина вкладываемой в разряд ВЧ-мощности заметно зависела от давления газа и на высотах $h < 100$ км составляла в среднем величину, приблизительно равную 0.5 кВт, на высотах $h \geq 130$ км – меньше 0.3 кВт и резко увеличивалась примерно до значения 0.6 кВт при напуске газа.

2.2. Модуляция разрядом потоков высыпавшихся частиц больших энергий. Основной целью экспериментов в полярной части Норвежского моря было исследование влияния поля излучения ракетного ВЧ-источника на возбуждение электромагнитных НЧ-неустойчивостей в полярной ионосфере и возможностей модуляции ВЧ-разрядом с борта ракеты потоков высыпавшихся частиц большой энергии. Эксперимент был реализован запуском метеорокетов МР-12 на широте 68° N и долготе 0° в вечернее время 20.09.86 в 22.45 по всемирному времени (UT), 9.10.89 в 18.31 UT и 6.10.89 в 19.19 UT. Для диагностики использовалась аппаратура на ракетах и комплексы научной аппаратуры на спутнике «Ореол-3» советско-французского проекта «Аркад-3» и спутнике «Ионозонд». Запуск ракеты 20.09.86 и 06.10.89 проходил в периоды геомагнитных возмущений и был согласован с полетом спутников «Ореол-3» (1986) и «Ионозонд» (1989), чтобы обеспечить возможность регистрации на борту

специальный напуск примерно 8 г воздуха в сторону антенны. За время выброса $\tau_n \sim 10$ с в ионосфере образовалась газовая неоднородность с масштабом $L \sim v_s \tau_n \sim 5$ км (v_s – скорость звука), в которой был сформирован вытянутый вдоль геомагнитного поля плазменно-волновой канал; концентрация в канале при этом возросла до значений $N > 10^8$ см $^{-3}$, резко увеличились потоки ускоренных электронов и мощность, отдаваемая ВЧ-генератором в плазму.

О вытянутости вдоль геомагнитного поля плазменной неоднородности свидетельствовала модуляция сигналов с фотометра, обусловленная вращением ракеты. В результате вращения ракеты блендирующее устройство ФЭУ просматривало либо большую, либо меньшую часть плазменного столба.

Подтверждением факта образования сильно вытянутого плазменно-волнового канала являются сдвиги по времени максимумов потоков быстрых электронов I_e (см. рис. 3) относительно максимумов $N(t)$, связанных с напуском газа на 134 и 218 секундах. Достаточно интенсивные по сравнению с фоном потоки электронов с энергией $\epsilon_e \geq 2.2$ кэВ

спутников низкочастотных электромагнитных возмущений в ионосфере вблизи силовой трубки геомагнитного поля, в которой находилась ракета. Особенностью запуска 9.10.89 в 18.31 UT была спокойная геомагнитная обстановка в указанной части Норвежского моря.

Результаты обработки телеметрической информации для старта 9 октября 1989 года [11] приведены на рис. 4, где полетное время и соответствующие высоты h ракеты над поверхностью земли показаны на горизонтальной оси. На вертикальной оси отложены величины плотности потока быстрых электронов I_e с энергией $E_e > 40$ кэВ (кривые 1,2). Кривая 3 на рис. 4 отражает циклограмму работы генератора накачки 480 кГц, аналогичную кривой 3 на рис. 3.

Наиболее важным результатом эксперимента является доказательство возможности модуляции плазменно-волновым разрядом в ионосфере потока высыпающихся электронов с энергиями $E_e \geq 40$ кэВ. В данном эксперименте, когда возмущенность магнитосферы была достаточно слабой, во время пауз в работе генератора накачки уровень потока всегда достигал своего фонового значения. Однако при включении генератора поток резко возрастал, уровень выпадения на высотах 130÷150 км превышал фоновое значение в 5÷10 раз. Отмеченные высоты, как видно из рис. 4, отвечают установившемуся, квазистационарному уровню потока при воздействии.

На верхнем графике рис. 4, а приведен фрагмент зависимости плотности потока быстрых электронов от времени полета, позволяющий проследить тонкую временную структуру потока. Из поведения кривых рис. 4 видно, что имеется несколько характерных времен, определяющих параметры вариации потока. Во-первых, это время выхода вариаций на квазистатическое состояние $\tau_1 \sim 1 \div 1.5$ мин. Далее есть характерные времена $\tau_2 \sim 2$ с и $\tau_3 \sim 0.3 \div 0.5$ с, отражающие тонкую структуру вариаций потока. И есть $\tau_4 \sim 1$ с – время, характеризующее процесс релаксации или нарастания потока при выключении и включении генератора. По-видимому, τ_2 – период баунс-осцилляций быстрых электронов между полярными шапками разных полушарий, а τ_3 – период колебаний ионосферного альвеновского резонатора (см. п. 2.4).

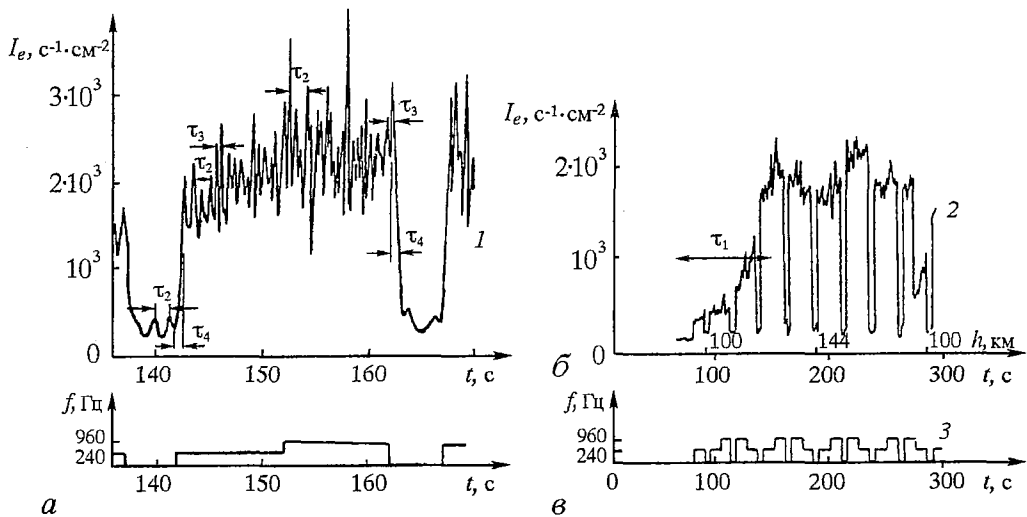


Рис. 4. Полярный эксперимент в спокойной ионосфере. Относительная модуляция потоков быстрых электронов с энергией $E_e \geq 40$ кэВ, стимулированная ВЧ-разрядом, формируемым бортовым источником, работающим в соответствии с циклограммой амплитудной модуляции (кривая 3). На горизонтальных осях отложены время t и высота h полета ракеты.

В экспериментах 20.09.86 и 06.10.89 при условиях более сильных возмущений магнитосферы (K_p -индекс был равен 4) фоновый уровень высыпавшихся быстрых электронов был на порядок больше. Глубина модуляции потока в соответствии с циклограммой работы ВЧ-генератора накачки оказалась порядка 30%, а время выхода на квазистационарные колебания существенно сократилось [12].

Отметим, что модуляция потоков высыпавшихся частиц означает генерацию переменного тока в возмущенной силовой трубке.

2.3. Возбуждение НЧ электромагнитных возмущений резонансным разрядом в полярной ионосфере. В эксперименте 20 сентября 1986 года приемная аппаратура спутника «Ореол-3» обнаружила сильные шумовые возмущения электромагнитных полей в ионосфере и возбуждение спорадических волновых резонансов в окрестности гирочастоты протонов при работе дипольного ВЧ-источника мощностью порядка 1 кВт на высотах $h \geq 140$ км в режиме телеграфной модуляции с частотами 240 и 960 Гц. После выхода ракеты с ВЧ-источником на борту на высоты $h > 120$ км приемники спутника зафиксировали появление интенсивных шумовых НЧ-сигналов. Область появления НЧ-сигналов лежит внутри авроральной зоны, местоположение которой определялось по измерениям продольного тока на спутнике. В [12] приведены в качестве примера графики изменений горизонтальной составляющей электрического поля, зафиксированные приемниками спутника в двух частотных интервалах: 450÷1000 Гц и 100÷200 Гц. Там же представлены графики изменений потоков ионов с энергией $\xi_i \sim 3.5$ кэВ и электронов с энергией $\xi_e \geq 40$ кэВ по данным приборов, установленных на борту ракеты, и циклограмма работы ВЧ-генератора.

В качестве источников возбуждения широкого спектра НЧ-возмущений в ионосфере в условиях эксперимента можно рассматривать вариации потоков высыпавшихся энергичных частиц (как естественного происхождения, так и стимулированные в результате воздействия), а также низкочастотную модуляцию локальных параметров ионосферной плазмы вблизи ракеты модулированным ВЧ-разрядом. В результате такого воздействия возможна заметная модуляция естественных ионосферных токовых струй, что наблюдалось в ряде экспериментов с наземными передатчиками [16].

Особый интерес представляют, по-видимому, спектры НЧ электромагнитных колебаний, зафиксированных аппаратурой спутника в верхней ионосфере в то

время, когда ВЧ-источник был выведен ракетой на высоты $h \geq 130$ км (UT=22.47.28÷22.49.04). В этих условиях, как оказалось, в ионосфере возбуждался целый спектр спорадических резонансных колебаний в окрестности гирочастоты ионов водорода f_H . На рис. 5 приведены примеры обработки волновых измерений со спутника для трех разных временных интервалов в этом эксперименте.

Кривая 1 - спектр горизонтальной составляющей электрического поля для случая работы источника на предельно малых для наблюдаемого эффекта высотах $h \approx 130$ км (UT≈22.47). На кривой хорошо выделены пики, соответствующие частоте модуляции $f_2 = 240$ Гц, частоте ее гармонике $3f_2$ и гирочастоте ионов водорода f_H .

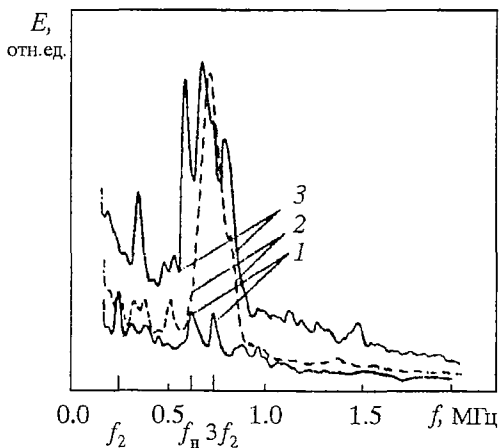


Рис. 5. Спектры НЧ-излучений, зарегистрированных на борту спутника во время работы ВЧ-генератора: 1 - высота ракеты $h = 130$ км, частота модуляции $f_2 = 240$ Гц; 2 - $h = 152$ км, $f_2 = 240$ Гц; 3 - $h = 156$ км, $f_1 = 960$ Гц

С ростом высоты полета ракеты h происходит существенное расширение полосы возбуждаемых частот вблизи f_H и наблюдается заметное увеличение амплитуды возбуждаемых в ионосфере колебаний (кривая 2, $h=152$ км, UT=22.48.16). И, наконец, кривая 3 (высота $h=155$ км, режим модуляции с частотой 960 Гц) показывает сложную динамику спектра низкочастотных колебаний, возбуждаемых на ионосферных высотах вблизи силовой трубки геомагнитного поля, где происходит воздействие. После прохождения апогея спектр шумовых спорадических излучений постепенно возвращался на уровень, соответствующий обычной шумовой картине. Наличие нескольких выделенных резонансных пиков на кривых рис. 5, по-видимому, не может быть объяснено нелинейным взаимодействием возбуждаемых НЧ-полей с плазмой ввиду их малости, но может служить подтверждением возможности существования в возмущенной полярной ионосфере НЧ свистовых и, возможно, сравнительно высокочастотных альвеновских резонансов. Достаточно быстрое изменение резонансных кривых во время эксперимента говорит о локальности и спорадичности обнаруженных резонансов. Резонансы связаны, по-видимому, с образованием в ионосфере резких плазменных неоднородностей с характерным масштабом в несколько десятков (сотен) километров вдоль геомагнитного поля и временем жизни в несколько секунд. Такие неоднородности могут образовываться во время магнитных бурь [17], а также при ионизационном самоканалировании сильных ВЧ-полей [13]. Поэтому исследование обнаруженных спорадических волновых НЧ-резонансов представляет значительный интерес как для понимания физики явления, так и для натурального моделирования некоторых нелинейных авроральных явлений в ионосфере Земли, а возможно, и для разработки новых средств НЧ-радиосвязи.

2.4. Плазменно-волновая антенна. Идея использования модулированного радиоразряда в качестве активной плазменной антенны была проверена в специальном ионосферном эксперименте, результаты которого представлены в данном разделе [14]. Эксперимент был реализован в ходе полета метеоракеты МР-12, запущенной с полигона Капустин Яр 06.02.91 в 20.30 по московскому времени. Ракета двигалась под углом 85° к горизонтالي в восточном направлении. Схема эксперимента описана в п. 2.3. Отличием данного эксперимента была конструкция антенны плазменных волн – электрического диполя, ориентированного поперек оси ракеты. В результате вращения ракеты возбуждающий разряд диполь поворачивался относительно силовых линий геомагнитного поля \mathbf{V}_0 и проходил все состояния ориентации от поперечной до продольной по отношению к \mathbf{V}_0 . Модуляция разряда в данном эксперименте осуществлялась на частотах $f_1=240$ Гц и $f_2=120$ Гц. В верхней части траектории полета были взорваны четыре калий-литиевых пиропатрона, один за другим с периодом порядка 10 секунд.

Бортовой НЧ-приемник с магнитной антенной, расположенный на откидной штанге на расстоянии 1 м от ракеты, как и в предыдущих экспериментах, фиксировал возбужденные в окружающей плазме сигналы с амплитудой $\Delta H > 0.04$ Ое, соответствующие частотам модуляции разряда f_1 и f_2 . Циклограмма зафиксированных сигналов строго соответствовала циклограмме работы генератора накачки, а величина сигналов оказалась больше динамического диапазона приемника. Можно предположить, что сигнал плазменной антенны обусловлен модуляцией геомагнитного поля H_0 , возникающей при формировании и рассасывании горячей плазменной неоднородности разряда в ионосфере. Его величина $\Delta H \sim H_0 \cdot W/P$ [9] пропорциональна отношению мощности W , вводимой в разряд, к мощности потерь энергии электронами разряда ($P \sim \delta v_e \epsilon_e N V$, δ – доля энергии, теряемая электроном при столкновении; V – объем плазменной

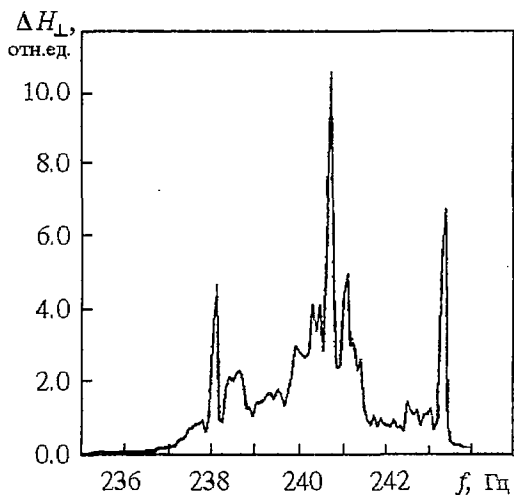


Рис. 6. Спектральный состав излучения плазменной антенны, принятый на земле. Время усреднения $\Delta t=300$ с

Прием СНЧ-сигналов (f_1 и f_2) на земле осуществлялся приемником «ТИС» с полосой $\Delta f=10$ Гц с помощью ферритовых антенн, ориентированных в восточном направлении для регистрации излучения с ортогональной по отношению к геомагнитному полю поляризацией ΔH_{\perp} (поляризация восток-запад) и в южном направлении для регистрации полей с преимущественно продольной поляризацией ΔH_{\parallel} (поляризация север-юг). Принятые на земле сигналы обеих поляризаций имели шумовой характер и отличались от фона большей в среднем амплитудой «шума». При спектральном анализе этих сигналов было обнаружено узкополосное излучение, сдвинутое относительно частот модуляции («мигания») разряда f_1 и f_2 в «синюю» сторону на величину $\Delta f_{1,2} \sim 3 \cdot 10^{-3} f_{1,2}$ (рис. 6), и наличие характерных модуляционных сателлитов, указывающих на амплитудную модуляцию принимаемого излучения. Отношение амплитуды модуляционных пиков на частоте 2.6 Гц к амплитуде основного сигнала максимально (≥ 0.1) для сигнала с поляризацией восток-запад, принимаемого на частоте 240 Гц. Поведение принимаемых сигналов во времени характеризует рис. 7, где по горизонтальной оси отложены частоты, по вертикальной оси – время от момента запуска ракеты, а величина почернения отражает амплитуду сигнала на заданной частоте в момент времени, соответствующий центру интервала спектральной обработки $\Delta t \sim 12$ с. На правой вертикальной оси дополнительной линией отмечено время работы генератора, формирующего разряд, и стрелками отмечены моменты взрывов пиропатронов.

Из приведенных данных следует, что регистрируемые сигналы появляются после включения генератора накачки и формирования в ионосфере плазменно-волнового разряда. Максимальные значения принятых сигналов совпадают (в пределах времени обработки, если $\Delta t \leq 6$ с) с моментами переключения режимов работы генератора накачки, что свидетельствует о наблюдении сигналов плазменной антенны, формируемой в ионосфере плазменно-волновым разрядом. Амплитуда сигналов ΔH_{\parallel} , принятых антенной с продольной поляризацией, оказалась на порядок больше амплитуды сигналов ΔH_{\perp} . После взрывов пиропатронов на 176, 186, 198 и 208-й секундах (стрелки на рис. 7) сигналы ΔH_{\perp} уменьшились по амплитуде и расщепились по частоте. Сигналы ΔH_{\parallel} , наоборот, достигли своего максимума во время взрывов, уменьшились после выключения

неоднородности) и уменьшается с ростом эффективной частоты столкновений электронов ν_e . Принимаемый диамагнитный сигнал $\Delta H \sim H_0$ содержит в себе все низкочастотные компоненты колебаний геомагнитного поля и может быть использован в диагностических целях. После взрывов пиропатронов и напусков газа величина принимаемых бортовым приемником СНЧ-сигналов уменьшалась на полтора-два порядка и постепенно восстанавливалась до прежнего уровня примерно за 6 секунд. Объяснение этого эффекта заключается в многократном увеличении плотности нейтрального газа в окрестности ракеты при взрывах и соответствующем увеличении эффективной частоты столкновений электронов ν_e .

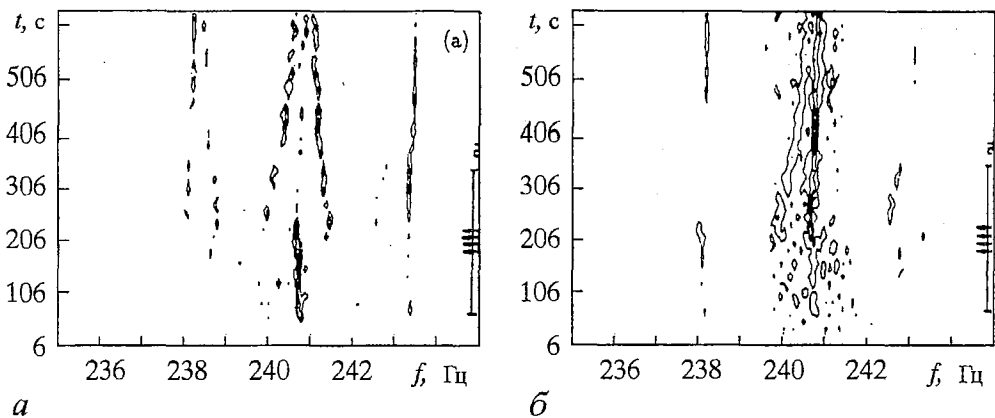


Рис. 7. Динамические спектры принятого на земле НЧ-излучения для поляризации восток-запад (а) и поляризации север-юг (б). Степень почернения пропорциональна величине спектральной плотности мощности сигнала. Справа вертикальной линией отмечено время работы бортового генератора, стрелки – моменты взрывов пиропатронов

генератора накачки и снова проявились в виде затухающей последовательности пиков, в которой также прослеживается расщепление по частоте. Модуляционные сигналы ($\pm f_3 = 2.6$ Гц) также видны после выключения генератора в виде двух замирающих последовательностей. В работе [18] модуляция излучения плазменной антенны с частотой 2.6 Гц, как и модуляция потоков высыпающихся частиц, объясняется возбуждением ионосферного альвеновского резонанса потоками быстрых электронов в возмущенной силовой трубке.

2.5. Влияние разрядной плазмы на излучение бортовых антенн. Влияние разрядной плазмы на характеристики излучения штатной телеметрической антенны ракеты показано в данном разделе [19].

Эксперимент был реализован в ходе полета метеоракеты МР-12, запущенной с полигона Капустин Яр 06.02.91 в 20.30 по московскому времени.

Основное внимание уделено начальному участку полета ракеты $h < 90$ км. На этих высотах плотность плазмы в разряде, формируемом АПВ, велика $N \gg 10^8$ см⁻³ и оказывает заметное влияние на характеристики телеметрического сигнала. Форма плазменного образования ВЧ-разряда на этом участке полета имеет вид покрывающей ракету оболочки. Размеры и форма этой оболочки зависят от соотношения длины свободного пробега электронов l_e с диффузионной длиной прилипания $l_d \sim (D/\nu_a)^{1/2}$ (D – коэффициент амбиполярной диффузии, ν_a – частота прилипания электронов к молекулам кислорода), гирорадиусом электронов r_H и масштабом сноса $l_{||} \sim v/\nu_a$ (v – скорость ракеты).

Теоретическое рассмотрение (см. ссылки в [20]) и лабораторные эксперименты [21,22] указывают на существенное влияние плазмы оболочки на входные и излучательные характеристики антенн. Отмечается, в частности, что оболочка может изменять входной импеданс антенны, ее сопротивление излучения и диаграмму направленности.

В ходе эксперимента на поверхности земли в районе места старта ракеты регистрировался телеметрический сигнал, представляющий собой последовательность радиоимпульсов с частотой заполнения 200 МГц. Сигнал излучался двумя петлевыми антеннами (ТА, см. рис. 2), симметрично расположенными по бокам ракеты, плоскость петель была параллельна образующей цилиндра тела ракеты.

Диагностика параметров плазменного образования производилась с

использованием ленгмюровского зонда и анализатора глубины вариаций геомагнитного поля, возникающих из-за диамагнетизма разрядной плазмы при формировании и релаксации плазменных неоднородностей. К сожалению, для описываемого этапа эксперимента значения концентрации в возбуждаемом разряде выходили за пределы калиброванной шкалы приборов или находились вблизи верхней границы этой шкалы, поэтому данные по концентрации нельзя считать слишком надежными. Интересные особенности в принимаемом телеметрическом сигнале наблюдались в первые 25 секунд работы возбуждающего разряд генератора. Генератор включался на 59 секунде полета, что соответствовало высоте $h \approx 70$ км. До 69 секунды ($h \approx 80$ км) сигнал генератора модулировался с частотой 240 Гц, после чего происходила смена частоты модуляции на 120 Гц и генератор работал еще 10 секунд.

По оценкам, выполненным на основе данных, полученных с анализатора вариаций геомагнитного поля и ленгмюровского зонда, можно заключить, что в первые десять секунд работы генератора концентрация плазмы N в области дипольного источника разряда значительно превышала 10^9 см $^{-3}$, о чем свидетельствовал выход показаний приборов за пределы калиброванной шкалы. После смены частоты модуляции концентрация упала до значений $N \geq 10^9$ см $^{-3}$ (порядка верхнего предела, доступного измерению) и далее медленно убывала до момента выключения генератора, после чего концентрация становилась близкой к фоновой.

После зажигания разряда (на 59 секунде полета) уровень принимаемого на земле телеметрического сигнала несколько уменьшался и далее медленно спадал до момента переключения частоты модуляции, а непосредственно перед переключением регистрировался неуверенно. После переключения частоты модуляции сигнал появлялся вновь с уровнем порядка исходного. Спустя две секунды (на 71 секунде полета) телеметрический сигнал резко возрос и, колеблясь, оставался большим до момента выключения генератора, создающего разряд. Уровень телеметрического сигнала после выключения генератора падал до исходного.

На рис. 8 представлена зависимость уровня принимаемого на земле телеметрического сигнала от времени полета ракеты $S(t)$ в интервале между 69 и 79-й секундами полета. Видно, что принимаемый сигнал усиливался более чем в десять раз. Вариации повышенного уровня сигнала рис. 8 соответствуют колеба-

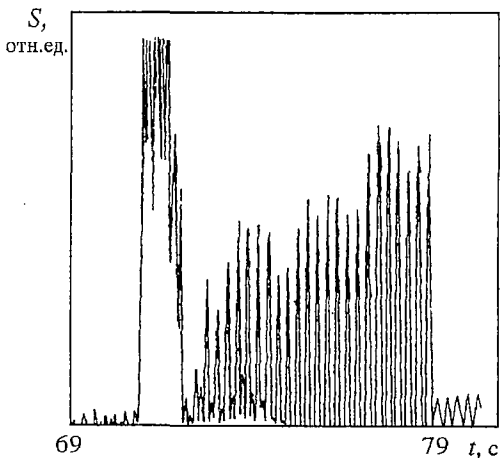


Рис. 8. Изменения уровня принимаемого телеметрического сигнала в зависимости от времени полета ракеты

ниям плотности плазмы в разряде в пределах 20%, что указывает на резонансный характер наблюдаемого явления. Быстрая модуляция $S(t)$ обусловлена вращением ракеты.

Аналогичные эффекты возрастания принимаемого телеметрического сигнала наблюдались на 100 и 110-й секундах полета при частоте модулирующего сигнала 240 Гц. При этом уровень сигнала был несколько меньшим, чем для описанного выше интервала времени, а интервал времени наблюдения эффекта существенно короче.

По нашему мнению, эффект связан с изменением диаграммы направленности телеметрической антенны из-за формирования вокруг тела ракеты

оболочки закритической плазмы. В оболочке возбуждаются медленные поверхностные волны, которые трансформируются в поле излучения на хвостовом оперении ракеты. Изменение частоты быстрой модуляции $S(t)$ на рис. 8 связано, по-видимому, с изменением условий переизлучения поверхностных волн на хвостовых стабилизаторах из-за вариаций параметров плазменной оболочки. Из-за малости диффузионной длины прилипания l_d на высотах $h < 80$ км плазма разряда локализована вблизи возбуждающей антенны в головной части ракеты и не влияет на величину телеметрического сигнала. На высотах $h \geq 120$ км плазменная неоднородность вытягивается вдоль геомагнитного поля и концентрация электронов у ракеты становится меньше критической для телеметрического сигнала. В результате величина телеметрического сигнала падает до обычного уровня, а величина сигнала, переизлучаемого на частоте поля, формирующего разряд, становится достаточной для уверенной регистрации на расстоянии более 1000 км от места запуска ракеты [23].

Заключение

Приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности формирования в ионосфере плазменно-волнового разряда и о его сильном влиянии на характеристики излучения бортовых антенн, особенно в вистлеровском диапазоне частот. Оказалось, что изменение геометрии разряда и мощности, вкладываемой в разряд, позволяет управлять угловым спектром излучения, его интенсивностью, а модуляцией разряда возможно изменять низкочастотный спектр излучения. На основании изложенных экспериментальных результатов, а также лабораторного моделирования этих явлений в плазменных камерах, можно сделать вывод о том, что подобные плазменные образования могут быть использованы в качестве легко управляемых нелинейных плазменно-волновых антенн в широком диапазоне частот, а также для достаточно эффективной накачки в заданную силовую трубку геомагнитного поля низкочастотных электромагнитных волн. Показана возможность глубокой модуляции потоков высыпающихся частиц таким разрядом.

Описанные эффекты должны приниматься во внимание при планировании и интерпретации ионосферных экспериментов и, вероятно, могут быть полезны для согласования излучателей космических аппаратов, а также для диагностики околоземного пространства. Кроме того, представленные результаты существенно расширяют наши знания о физике волновых разрядов в ионосферной плазме.

Работа выполнена при поддержке программы «Университеты России», грант № 992852, и программы поддержки ведущих научных школ, грант № 00-15-96772.

Библиографический список

1. Марков Г.А., Миронов В.А., Сергеев А.М. О самоканализации плазменных волн в магнитном поле // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. С. 672.
2. Марков Г.А., Миронов В.А., Сергеев А.М., Соколова И.А. Многопучковая самоканализация плазменных волн // ЖЭТФ. 1981. Т. 80, № 6. С. 2264.
3. Марков Г.А., Миронов В.А., Сергеев А.М., Савин В.Г. Фокусировка и каналирование нижнегибридных волн и плазмы при ВЧ пробое газа // Физика плазмы. 1980. Т. 6, № 3. С. 670.
4. Вдовиченко И.А., Марков Г.А., Миронов В.А., Сергеев А.М. Ионизационная самоканализация вистлеров в плазме // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44, вып. 5. С. 216.

5. Марков Г.А. Ионизационное самоканалирование модулированных плазменно-волновых пучков в магнитном поле // ЖЭТФ. 1998. Т. 113, вып. 4. С. 1989.
6. Кудрин А.В., Курина Л.Е., Марков Г.А. Ионизационное самоканалирование свистовых волн в столкновительной замагниченной плазме // ЖЭТФ. 1997. Т. 112, вып. 4(10). С. 1285.
7. Марков Г.А. Наблюдение резонансной автонастройки магнитных антенн плазмой ВЧ-разряда // Физика плазмы. 1988. Т. 14, № 9. С. 1094.
8. Марков Г.А., Попова Л.Л., Чугунов Ю.В. Моделирование нелинейного воздействия пучка плазменных волн на ионосферную плазму // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11, № 23. С. 1465.
9. Кудрин А.В., Марков Г.А., Трахтенгерц В.Ю. и др. Эффекты вторичного излучения при воздействии на ионосферу интенсивным электромагнитным пучком // Геомагнетизм и аэронавигация. 1991. Т. 31, № 2. С. 334.
10. Агафонов Ю.Н., Бабаев А.П., Бажанов В.С. и др. Плазменно-волновой разряд в ионосфере Земли // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15, № 17. С. 1.
11. Агафонов Ю.Н., Бажанов В.С., Исякаев В.Я. и др. Стимулирование высывания энергичных частиц плазменно-волновым разрядом в полярной ионосфере // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 52, № 10. С. 1127.
12. Агафонов Ю.Н., Бажанов В.С., Галперин Ю.И. и др. НЧ-возмущения в ионосферной плазме, стимулированные бортовым ВЧ-источником // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16, № 1. С. 65.
13. Марков Г.А., Чугунов Ю.В. Глобальные магнитосферные возмущения, стимулированные плазменно-волновым разрядом в нижней ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, вып. 6. С. 799.
14. Агафонов Ю.Н., Башилов Г.В., Марков Г.А., Чугунов Ю.В. Активная плазменная антенна в ионосфере Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 1996. Т. 36, № 4. С. 206.
15. Фаткуллин М.Н. и др. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. М.: Наука, 1981. 286 с.
16. Гетманцев Г.Г., Комраков Н.П., Коробков П.П., Мироненко Л., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю., Фролов В.Л., Череповицкий В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. С. 621.
17. Лайонс Л., Уильямс Д. // Физика магнитосферы. М.: Мир, 1987. 312 с.
18. Лехтинен Н.Г., Марков Г.А., Файнштейн С.М. Возбуждение альвеновского резонатора плазменно-волновым разрядом // Изв. вузов. Радиофизика. 1995. Т. 38, № 3-4. С. 312.
19. Марков Г.А., Умнов А.Л. Влияние плазмы ВЧ разряда на излучение телеметрической антенны метеоракеты // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41, № 1. С. 121.
20. Мареев Е.А., Чугунов Ю.В. Антенны в плазме. Н.Новгород: ИПФ АН СССР, 1991. 230 с.
21. Ким А.В., Марков Г.А., Смирнов А.В., Умнов А.Л. Плазменная антенна-генератор // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. С. 34.
22. Курина Л.Е., Марков Г.А., Умнов А.Л. Моделирование спутниковой антенны, настраиваемой плазменной нагрузкой // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 6. С. 707.
23. Дейнеко В.М., Иванов В.И., Марков Г.А., Чугунов Ю.В. Влияние плазменно-волнового разряда на излучение дипольной антенны, стимулирующей этот разряд в нижней ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 1993. Т. 33, № 2. С. 160.

*Нижегородский государственный
университет*

Поступила в редакцию 28.12.2000

RESONANCE PLASMA-WAVE DISCHARGE IN THE EARTH'S IONOSPHERE

G.A. Markov, YU.V. Chugunov

The possibilities of formation of a wave discharge in the whistler frequency range in the Earth's ionosphere are showed experimentally. The structure and dynamics of discharge are discussed. Data on perturbations stimulated by a modulated discharge in the near-Earth space are presented. The possibilities of using such a discharge as a low-frequency plasma antenna are demonstrated.



Марков Герман Анатольевич – родился в 1939 году, окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (1963). После окончания ГГУ работает на кафедре электродинамики Нижегородского государственного университета. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1975) и доктора (1989) физико-математических наук в области радиофизики и физики плазмы. Опубликовал 80 научных статей по направлениям, указанным выше.



Чугунов Юрий Владимирович – родился в 1941 году, окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (1965). После окончания ГГУ работает в Институте прикладной физики РАН. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1973) и доктора (1988) физико-математических наук в области радиофизики и физики плазмы. Автор монографии «Антенны в плазме». Опубликовал более 90 научных статей по направлениям, указанным выше.