

УДК 533.951.2

УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГАРМОНИКАХ ЭЛЕКТРОННОЙ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА СПУТНИКЕ "КОСМОС-1809"

© 1995 г. Н. В. Баранец****, В. В. Афонин*,
В. А. Гладышев**, Г. П. Комраков***, Г. В. Васильев***

*Институт космических исследований РАН, г. Москва

**Объединенный институт физики Земли РАН, г. Москва

***Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород

****Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, г. Троицк

Поступила в редакцию 12.04.94 г.

Исследованы различные механизмы ускорения электронов ионосферной плазмы ВЧ-излучением бортового передатчика на гармониках электронной циклотронной частоты. Использование спектрометра заряженных частиц с широкой апертурой для регистрации питч-углового распределения от 0° до 180° позволило обнаружить ускорение электронов по продольной к магнитному полю составляющей скорости электронов. Для анализа зависимости интенсивности ускоренных электронов от частоты излучения при различных углах ориентации дипольной антенны к магнитному полю и различных значениях параметра $q = \omega_{pe}^2 / \omega_{ce}^2$ сделаны оценки коэффициентов поглощения обыкновенной и необыкновенной мод. Впервые обнаружено взаимодействие электронных пучков с волноводными модами (ТЕМ-модами) на циклотронных гармониках в некоторой области вокруг антенны при продольной по отношению к магнитному полю ориентации дипольной антенны.

На борту спутника "Космос-1809" была установлена ионосферная станция ИС-338 для проведения радиозондирования ионосферной плазмы и дальнейшего изучения воздействия электромагнитного излучения на заряженные частицы в околоспутниковой области. Несмотря на то, что теория такого взаимодействия достаточно хорошо развита, интерес к проведению экспериментов, подтверждающих ее выводы, не ослабевает и обусловлен необходимостью понимания распространения и поглощения электромагнитных волн в ионосфере. С этой целью был проведен эксперимент на спутнике "Космос-1809" по регистрации ускоренных частиц под действием высокочастотного излучения во время работы бортовой ионосферной станции ИС-338. Регистрация ускоренных частиц проводилась оригинальным спектрометром СФ-3М в диапазоне энергий от 0.01 до 10.2 кэВ для электронов и от 0.01 до 9.6 кэВ для ионов во всем диапазоне питч-углов по четырем угловым секторам с раствором углов ~30°. Измерение электронной концентрации n_e и температуры T_e проводилось импедансным зондом ИЗ-2 и ленгмюровским зондом КМ-9. Ориентацию магнитного поля Земли в спутниковой системе координат определяли по данным бортового магнитометра, а гирочастоту электронов по модельным расчетам. Относительное расположение датчиков измерительной аппаратуры показано на

рис. 1. Основные характеристики передатчика ИС-338 приведены ниже:

Длина антенны для	
0.3 - 5.0 МГц (1)	50 м
5.0 - 15.95 МГц (2)	16 м
Радиус трубки антенны	0.012 м
Длительность импульса	133 мкс
Частота повторения	58.6 Гц
Дискретность частотного диапазона	
0.3 - 1.5 МГц	0.025 МГц
1.5 - 15.95 МГц	0.050 МГц

Первые результаты по ускорению частиц ионосферной плазмы по измерениям на спутнике "Космос-1809" приведены в работе Ф.К. Шуйской, Ю.И. Гальперина и др. [1]. В этом сообщении основное внимание мы уделим изучению резонансного взаимодействия ВЧ-излучения с ионосферной плазмой на гармониках электронной гирочастоты ω_{ce} . Для удобства представления экспериментальных данных характерные плазменные частоты и частоту излучения передатчика на рисунках мы будем приводить в виде периодических частот.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования всплесков электронов во время работы бортового передатчика выбирались участки полета спутника, когда невозмущенные потоки электронов на 3 - 4 минутном интервале полета изменялись незначительно. Регистрация невозмущенных потоков спектрометром СФ-3М происходила во время 2-секундной паузы в работе передатчика ИС-338. Чаще всего такие спокойные условия наблюдались на средних и низких широтах, иногда на более высоких, что позволило регистрировать всплески ускоренных электронов при значениях $f_{ce} = \omega_{ce}/2\pi \geq 1$ МГц. Следует также подчеркнуть, что регистрируемые возмущенные потоки со временем накопления 80 мс были результатом действия на плазму нескольких ВЧ-импульсов. Это с одной стороны увеличивало ошибку в точном определении частоты возмущения, а с другой носило осредняющий характер и было положительным моментом, если принять во внимание невозможность одно-
 -енного измерения потоков заряженных частиц во всем диапазоне питч-углов и других параметров ионосферной плазмы из-за технических условий опроса телеметрических каналов.

В первых экспериментах, проведенных на спутнике "Интеркосмос-19" (впоследствии подтвердившихся по данным спутников ISIS-I и II), было отмечено появление всплесков ускоренных электронов на частотах, близких к гирочастоте ω_{ce} и ее гармоникам, преимущественно ускорение наблюдалось по перпендикулярной к магнитному полю составляющей скорости электронов [2, 3]. Проведенный эксперимент на борту спутника "Космос-1809" не только подтвердил факт регистрации всплесков электронов на циклотронных гармониках, но и выявил многообразие резонансов в зависимости от параметра $q = \omega_{pe}^2 / \omega_{ce}^2$, питч-углов регистрации α_p и ориентации дипольной антенны по отношению к магнитному полю Земли с напряженностью H_0 (см. рис. 1). Плазменная гирота $\omega_{pe}^2 = 4\pi e^2 n_e / m_e$, где e и m_e - заряд и масса электрона.

1. ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДАЕМЫХ РЕЗОНАНСОВ НА ПЕРВЫХ ДВУХ ГАРМОНИКАХ ω_{ce} ПРИ ИЗЛУЧЕНИИ ДИПОЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Известно, что условие резонансного взаимодействия электромагнитной волны с электронами, обладающими скоростью v , определяется соотношением (нормальный эффект Доплера)

$$\omega_0 = s\omega_{ce} + k_0^{\parallel} v^{\parallel}, \quad (1)$$

в котором ω_0 - частота волны, s - номер гармоники, а величины k_0^{\parallel} , v^{\parallel} - проекции волнового век-

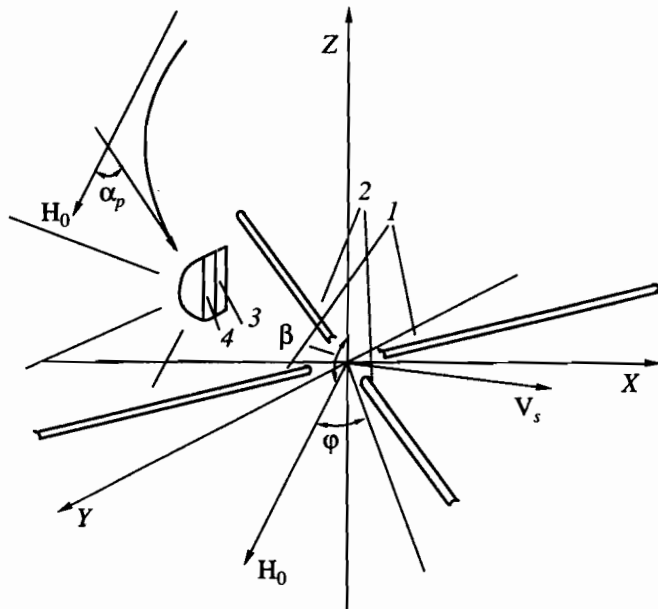


Рис. 1. Расположение датчиков спектрометра СФ-3М и двух дипольных пар антенной системы ионосферной станции ИС-338 в спутниковой системе координат (ось Z направлена от Земли).

1 - дипольная антенна с длиной плеча 25 м, рабочий диапазон частот 0.3 - 5.0 МГц; 2 - дипольная антенна с длиной плеча 7.5 м, рабочий диапазон частот 5.0 - 15.95 МГц; 3 - датчик ионов; 4 - датчик электронов; H_0 - направление магнитного поля Земли, β - угол между H_0 и осью Z, ϕ - угол между H_0 и плоскостью, перпендикулярной к оси антенной пары 1, α_p - питч-угол частицы, попавшей во входную апертуру датчиков, V_s - направление вектора скорости спутника.

тора и скорости частицы на направление магнитного поля. Существует два характерных интервала углов распространения волны по отношению к магнитному полю:

$$1) |\pi/2 - \theta| \geq \beta_T/n_j, \quad (2)$$

где $\beta_T = \sqrt{T_e/m_e c^2}$, n_j - показатель преломления j-ой моды, θ - угол распространения.

2) Интервал углов, близко примыкающих к $\pi/2$

$$|\pi/2 - \theta| \leq \beta_T/n_j, \quad (3)$$

для которых в условии Доплера можно пренебречь слагаемым $k_0^{\parallel} v^{\parallel}$. Амплитуда электрического поля E_0^j , волновой вектор k_0 и другие характеристики излучения дипольной антенны вычислялись нами на основе применения магнитогидродинамической теории [4, 5].

Кроме выполнения соотношения (1) для резонансного взаимодействия с волной необходима соответствующая поляризация поля в волне. Наиболее четко резонансный характер взаимодействия проявляется при наличии циркулярно поляризованной компоненты электрического поля (в

плоскости, перпендикулярной магнитному полю Земли), вращающегося в ту же сторону, что и электрон. При наличии перпендикулярной по отношению к магнитному полю составляющей волнового вектора k_0^\perp электроны резонансно взаимодействуют с продольной по отношению к вектору \mathbf{H}_0 компонентой поля волны [6]. Первый механизм реализуется при распространении необыкновенной волны вдоль магнитного поля, второй – при распространении обыкновенной волны поперек магнитного поля. Оба эти механизма резонансного взаимодействия определяют характер движения электронов и поглощения волн на гармониках гирочастоты электронов, при этом существенен учет конечности отношения гирорадиуса электронов к поперечной длине волны $k_0^\perp r_{ce} \neq 0$. Поскольку излучение дипольной антенны обладает осевой симметрией (ось симметрии совпадает с самой антенной), то существуют особые направления распространения, оказывающие наиболее заметное влияние на движение электронов по винтовым линиям в условиях резонансного взаимодействия при выполнении соотношения (1). При регистрации ускоренных электронов на частоте ω_{ce} в диапазоне питч-углов $\alpha_p \sim 70^\circ - 110^\circ$ такими характерными направлениями, очевидно, будут продольные, а для питч-углов $\alpha_p \sim 140^\circ - 170^\circ$; $0^\circ - 30^\circ$ – квазипоперечные направления распространения.

а) На резонансное взаимодействие волны накачки с электронами заметное влияние оказывает близость гирочастоты ω_{ce} к частоте резонанса антенны (т.е. частоте, на которой происходит смена знака реактивности антенны при излучении данного типа волн), приводящая к аномально большому вкладу слагаемого $k_0^\perp v^\perp$ в условие (1). Поскольку ускорение электронов на циклотронных гармониках $\sim \frac{E_0^j}{|\omega_0 - \omega_{ce}|}$, то резонансный контур возмущенных потоков электронов будет промодулирован электрическим полем волны накачки. На рис. 2а для случая $q \sim 2.25$ представлены зависимости возмущенных потоков электронов с энергией $\epsilon_e = 238$ эВ для четырех питч-угловых секторов регистрации, зависимости квадрата показателя преломления необыкновенной ($j = 1$) и обыкновенной ($j = 2$) волн, а также амплитуды электрического поля поперечной компоненты E_0^j (по отношению к направлению распространения волны) от частоты излучения передатчика f_0 .

В дальней зоне излучения применимость магнитогиродинамической теории при вычислении характеристик излучения антенны вполне обоснована. Направление распространения по отношению к магнитному полю (угол θ) НО-волны

было выбрано близким к продольному, а направление О-волны – квазипоперечным. При излучении НО-волны собственный резонанс антенны происходит в двух точках резонансного диапазона частот (соответственно для медленной (Z) и быстрой (X) моды колебаний) и в одной точке при излучении О-волны. Показатели преломления электромагнитных волн определялись по хорошо известным выражениям для холодной плазмы:

$$n = 1 - \frac{2v(1-v)}{2(1-v) - u \sin^2 \theta \mp \sqrt{u^2 \sin^4 \theta + 4u(1-v)^2 \cos^2 \theta}} \quad (4)$$

где $v = \omega_{pe}^2 / \omega_0^2 = q/s^2$, и $u = \omega_{ce}^2 / \omega_0^2 = 1/s^2$, верхний знак в знаменателе (–) соответствует НО-волне, нижний (+) О-волне. Резонансная верхнегибридная частота колебаний плазмы определялась выражением

$$\omega_{UH} = [1/2 (\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2) + 1/2 \sqrt{(\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2)^2 - 4\omega_{pe}^2 \omega_{ce}^2 \cos^2 \theta}]^{1/2} \quad (5)$$

Более сильные возмущения электронных потоков на ω_{ce} с питч-углами $0^\circ - 30^\circ$ вызваны резонансным усилением амплитуды поля волны и волнового вектора О-моды. На той же части рисунка, где представлены электронные потоки с $\alpha_p \approx 0^\circ - 30^\circ$, можно отметить две важные особенности – отсутствие возмущений электронных потоков с энергией 238 эВ на частотах $\omega_0 > \omega_{pe}$, соответствующих области прозрачности плазмы для О-моды, и отсутствие возмущений на резонансной частоте $\omega_0 \approx 2\omega_{ce}$, которое станет понятным при рассмотрении поглощения электромагнитных волн обоих типов для различных значений параметра q . Спектр возмущений дифференциальных потоков электронов с питч-углами $0^\circ - 35^\circ$ приведен на рис. 6а. На рис. 2а уширенная контура возмущений для питч-углов $\sim 75^\circ - 110^\circ$ вызвано резонансным увеличением доплеровской поправки при излучении НО-волны и на частотах излучения $\omega_0 \approx \omega_{UH}$ линейной трансформацией НО-волны в электростатическую моду с последующим поглощением энергии группой быстрых резонансных электронов [7]. На рис. 6б представлен энергетический спектр возмущений на частотах резонансного усиления мощности излучения НО-волны и спектр возмущений на верхнегибридной частоте ω_{UH} .

б) На рис. 2б для случая $q \approx 0.25$, соответствующего области прозрачности при излучении обыкновенной и необыкновенной моды, представлены возмущения электронных потоков на первой циклотронной гармонике для четырех секторов питч-углового диапазона, квадрат коэффи-

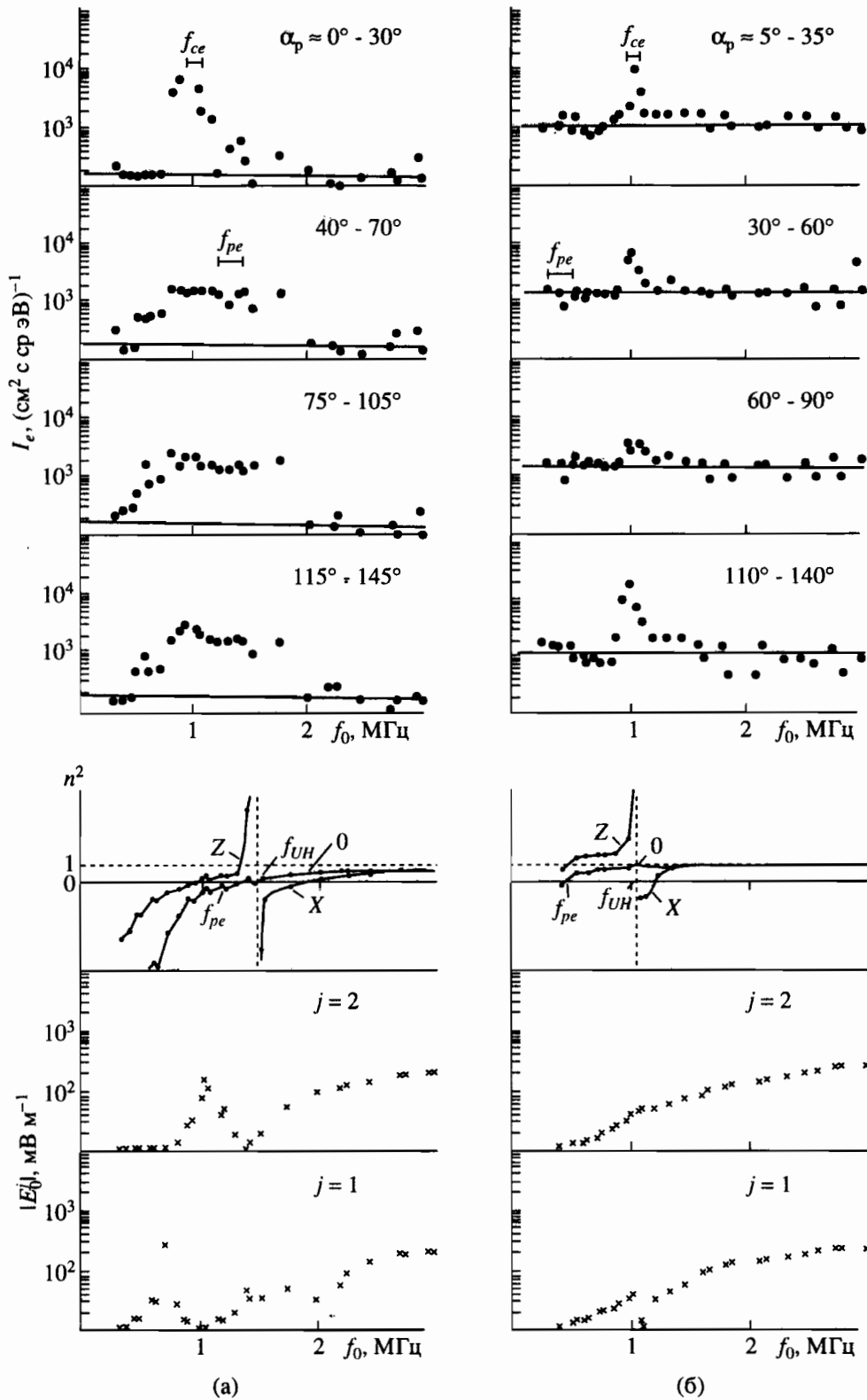


Рис. 2. Зависимости возмущенных потоков электронов с энергией $\epsilon_e = 238$ эВ от частоты излучения передатчика f_0 для четырех питч-угловых секторов регистрации (горизонтальные прямые – уровни невозмущенных потоков электронов); зависимости квадратов показателей преломления для O-моды ($\theta \sim 80^\circ$), Z- и X-моды ($\theta \sim 10^\circ$). f_{UH} – резонансная верхнегибридная частота (вертикальная пунктирная прямая); зависимости амплитуды электрического поля продольной компоненты в дальней зоне излучения (~ 200 м) для $j = 1, 2$. а – 27.I.1987, виток 554, $L_{dip} \approx 38^\circ - 44^\circ$, б – 21.XII.1986, виток 43, $L_{dip} \approx 72^\circ - 78^\circ$.

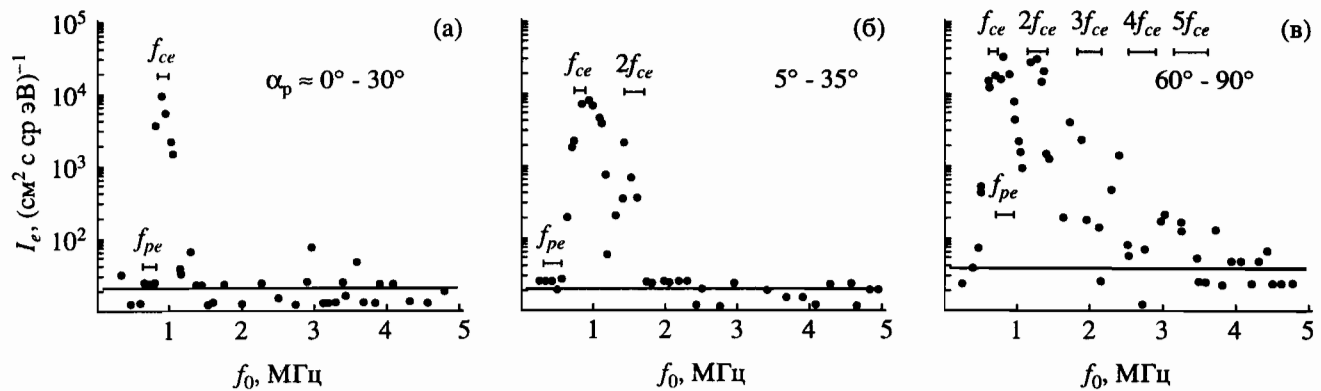


Рис. 3. Резонансное усиление потоков электронов на гармониках гирочастоты sf_{ce} , $s = 1, 2, 3, 4, 5$ ($\epsilon_e = 396$ эВ). а – 30.I.1987, виток 675, $L_{dip} \approx 61^\circ - 67^\circ$; б – 30.I.1987, виток 675, $L_{dip} \approx 45^\circ - 52^\circ$; в – 21.XII.1986, виток 43, $L_{dip} \approx 27^\circ - 35^\circ$; горизонтальные прямые – уровни невозмущенных потоков.

циента преломления и амплитуда электрического поля в дальней зоне излучения для этих двух типов волн. Основное отличие циклотронного резонанса при этом значении параметра q заключается в относительно более узком контуре возмущений на первой циклотронной гармонике во всем диапазоне питч-углов и особенно узком для питч-углов $5^\circ - 35^\circ$. Сравнение возмущений электронных потоков для секторов $5^\circ - 35^\circ$ и $60^\circ - 90^\circ$ с электрическим полем соответственно обыкновенной и необыкновенной моды обнаруживает амплитудную корреляцию. Очень важной особенностью является отсутствие возмущений на второй циклотронной гармонике для всех питч-углов. На рис. 6в для случая $q \approx 0.25$ и интервала питч-углов $5^\circ - 35^\circ$ представлен энергетический спектр возмущений дифференциальных потоков электронов на первой циклотронной гармонике. По сравнению со спектром возмущений потоков электронов в плазме с параметром $q \approx 2.25$, возмущения на ω_{ce} в нашем рассматриваемом случае наблюдаются в более узком диапазоне энергий. К вопросу об энергетическом диапазоне возмущений на циклотронных гармониках мы еще вернемся, а пока из всего вышеизложенного рассмотрения становится понятной необходимость выяснения зависимости возмущений электронных потоков при циклотронном резонансе от параметра q и ориентации дипольной антенны по отношению к магнитному полю Земли.

2. ЗАВИСИМОСТЬ НАБЛЮДАЕМЫХ РЕЗОНАНСОВ ОТ ПАРАМЕТРА q И ОРИЕНТАЦИИ ДИПОЛЬНОЙ АНТЕННЫ К МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

Прежде, чем перейти к рассмотрению возмущений электронных потоков на гармониках гирочастоты при различных значениях параметра q , необходимо подчеркнуть несколько важных особенностей взаимодействия ВЧ-излучения с ионо-

сферной плазмой и методики изучения стимулированных всплесков на резонансных частотах. Для параметров q , соответствующих случаю прозрачности ионосферной плазмы при излучении какой-либо моды, механизмы циклотронного и черенковского поглощения электромагнитных волн на первой гармонике гирочастоты приводят к очень сильному затуханию амплитуды волн уже на расстояниях ~ 100 м от источника. С другой стороны, в условиях непрозрачности электромагнитные волны с соответствующей поляризацией проникают в плазму на глубину скин-слоя $\delta_s \sim c/\omega_{ce}$, которая по порядку величины сравнима с характерным расстоянием циклотронного затухания волны, поэтому и в этом случае существует область для циклотронного резонанса. Это подтверждается результатами регистрации стимулированных потоков электронов на первой гармонике ω_{ce} . Можно сказать, что область циклотронного резонанса представляет собой промежуточную зону излучения дипольной антенны, в которой присутствуют все составляющие электромагнитного поля и понятие диаграммы направленности для поля еще не применимо в этой области.

Следует также отметить, что выбранная нами методика регистрации возмущений потоков электронов на 3 - 4 минутном интервале работы передатчика ионосферной станции не позволяет достаточно точно определять частоты ω_{pe} , $s\omega_{ce}$ ($s = 1, 2, 3, \dots$), поэтому представляемые экспериментальные результаты зависимости возмущений потоков электронов от частоты излучения как на дифференциальных спектрах, так и на одной выбранной нами энергетической ступени эквивалентны случаю взаимодействия волн с неоднородной плазмой в неоднородном магнитном поле. Наряду с широкой апертурой пучка волн, воздействующих на ионосферную плазму, это служит одной из причин наших наблюдений возмущенных электронных потоков в достаточно широком диапазоне частот и

энергий. В зависимости от угла между осью антенны и магнитным полем Земли мы рассмотрим три частных случая, когда антенна ориентирована в направлении, близком к поперечному, продольному и под некоторым углом к магнитному полю Земли. Ориентацию антенны будем задавать двумя углами φ, β (рис. 1).

а) $\beta \approx 160^\circ; \varphi \approx 75^\circ; q \approx 0.5$ (рис. 3а). На этом рисунке представлены потоки электронов с энергией 396 эВ и питч-углами $0^\circ - 30^\circ$ в зависимости от частоты излучения передатчика, ориентация антенны к магнитному полю близка к поперечной. Интенсивный всплеск потоков электронов наблюдается только на первой циклотронной гармонике ω_{ce} . Несмотря на питч-угловой сектор регистрируемых потоков в диапазоне $0^\circ - 30^\circ$, возмущения потоков электронов при рассматриваемой ориентации антенны к магнитному полю и параметре $q \sim 0.5$ вызваны преимущественно взаимодействием с НО-волной. Для разъяснения этого утверждения приведем расчетные значения

коэффициентов поглощения необыкновенной и обыкновенной моды для различных параметров q и θ на первой циклотронной гармонике ω_{ce} , поскольку ясно, что резонансное возмущение потоков и поглощения электромагнитных волн являются результатом одного и того же механизма взаимодействия. Как известно, коэффициент поглощения электромагнитных волн на первых двух циклотронных гармониках можно представить в виде [8]

$$\kappa_j = \beta_T \Phi_j(\theta, q) f(z_j) \frac{\omega_0}{c}, \quad (6)$$

где функция $\Phi_j(\theta, q)$ определяет зависимость коэффициентов поглощения от параметра q и угла распространения θ , а функция $f(z_j)$ определяет форму линии поглощения от величины $z_j = \frac{\omega_0 - s\omega_{ce}}{n_j \beta_T \cos \theta}$.

Нас прежде всего интересует поведение функции $\Phi_j(\theta, q)$, поскольку теоретический контур линии поглощения невозможно экспериментально проверить в нашем случае из-за достаточно большой дискретности экспериментальных данных и уширения резонансных контуров, связанного с методикой обработки данных спектрометра СФ-3М. Вид функции Φ_j ($j = 1, 2$) на первой гармонике ω_{ce} определяется выражением, справедливым для максвелловской плазмы [9]

$$\Phi_j(\theta, q) = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \frac{1}{1 + K_j^2} \frac{\cos \theta}{q \sin^4 \theta} \{ 2(1 - q \cos^2 \theta) + K_j \cos \theta [2(1 - q) + q \operatorname{tg}^2 \theta] \}^2. \quad (7)$$

Коэффициенты поляризации K_j, Γ_j определя-

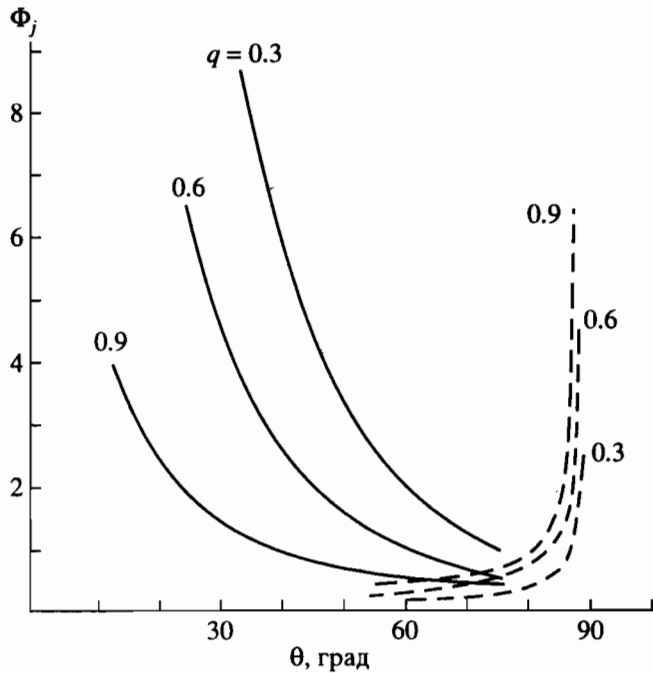


Рис. 4. Угловые зависимости коэффициентов циклотронного поглощения на первой гармонике f_{ce} (сплошные линии – для необыкновенной волны, штриховая – для обыкновенной).

ются хорошо известными выражениями

$$K_j = \frac{2\sqrt{u}(1 - v) \cos \theta}{u \sin^2 \theta \pm \sqrt{u^2 \sin^4 \theta + 4u(1 - v)^2 \cos^2 \theta}}, \quad (8)$$

$$\Gamma_j = \frac{v\sqrt{u} \sin \theta (1 + K_j \sqrt{u} \cos^2 \theta)}{1 - u - v + uv \cos^2 \theta}.$$

На рис. 4 представлены угловые зависимости функции Φ_j для электромагнитных волн при различных значениях параметра q и фиксированной расстройке $\omega_0 - \omega_{ce}$. При квазипоперечных углах распространения максимально циклотронное поглощение обыкновенных волн, зависимость Φ_2 от параметра q свидетельствует о более сильном поглощении О-моды в плазме с большей плотностью. Поглощение НО-моды значительно в широком диапазоне углов для разреженной плазмы и увеличивается при $\theta \rightarrow 0$. Возвращаясь теперь к рассматриваемому случаю резонанса на ω_{ce} при $q \approx 0.5$ и поперечной к магнитному полю ориентации антенны, а также принимая во внимание, что в этом диапазоне излучаемых частот произведение $k_0 h \ll 1$ ($2h$ – длина антенны), становится понятной нереальность регистрации возмущений потоков электронов на первой гармонике ω_{ce} , вызванных взаимодействием с О-волной при квазипоперечных углах распространения. Очевидно, что такая возможность может быть реализована при наклонной ориентации дипольной антенны к магнитному

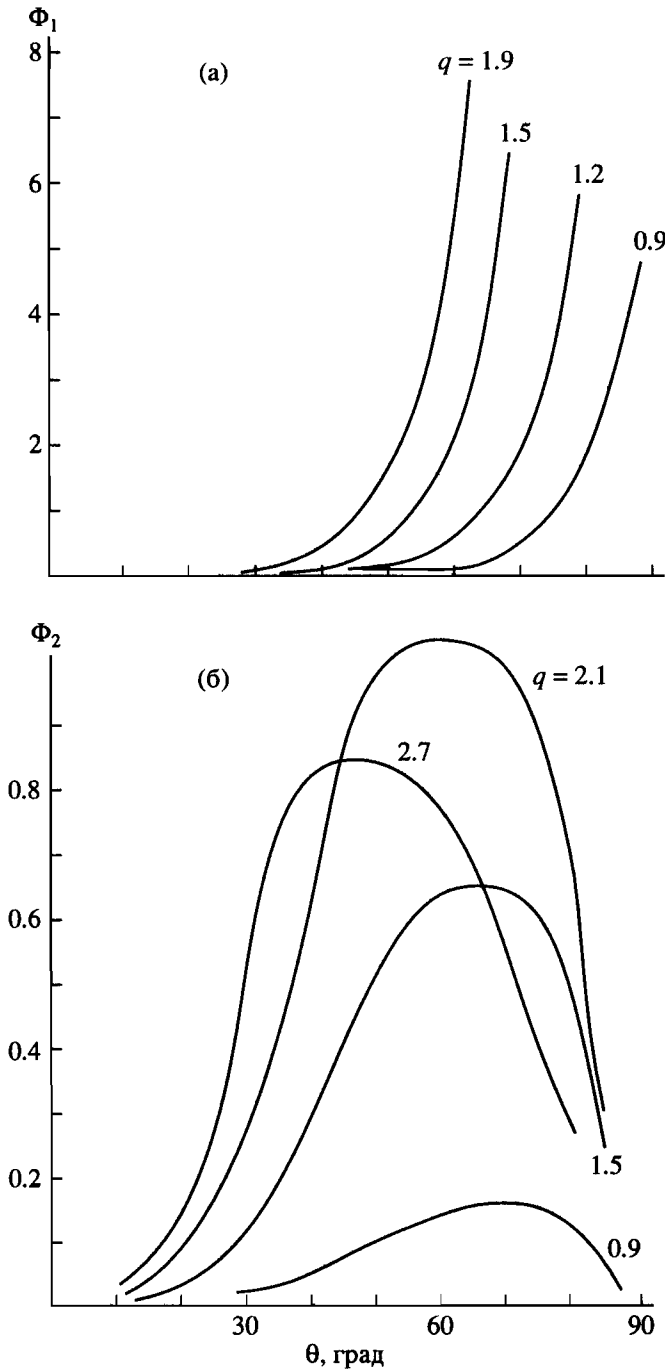


Рис. 5. Угловые зависимости коэффициентов циклотронного поглощения на второй гармонике $2f_{ce}$. а — для необыкновенной волны, б — для обыкновенной.

полю. На рис. 6г представлен спектр возмущений потоков электронов на первой циклотронной гармонике, особенностью которого является широкий энергетический диапазон наблюдаемых возмущений от 0.01 кэВ до ~1 кэВ.

б) $\beta \approx 140^\circ$; $\varphi \approx 70^\circ$; $q \approx 0.3$ (рис. 3б). В отличие от предыдущего случая здесь мы большее внима-

ние уделим наблюдаемому резонансу на второй циклотронной гармонике ω_{ce} при наклонной ориентации дипольной антенны к магнитному полю. Вообще говоря, при такой ориентации антенны оба механизма взаимодействия обыкновенной и необыкновенной мод с ионосферной плазмой могут привести к регистрации всплесков для первых двух циклотронных гармоник. Однако, и в этом случае основной вклад в появление возмущенных потоков на $2\omega_{ce}$ вносит НО-волна.

Функция $\Phi_j(\theta, q)$, при условии, что показатели преломления не очень сильно отличаются от единицы, для плазмы с максвелловской функцией распределения электронов приближенно может быть представлена для гармоник $s \geq 2$ в виде [10]

$$\Phi_j(\theta, q) = \sqrt{\pi/2} \frac{q}{s^2} \frac{s^{2s}}{2^s s!} \beta_T^{2s-4} n_j^{2s-4} \frac{\sin^{2s-2}\theta}{|\cos\theta|} \times \frac{(1 + K_j \cos\theta - \Gamma_j \sin\theta)^2}{1 + K_j^2} \quad (9)$$

На рис. 5 приведены зависимости Φ_1 и Φ_2 от углов распространения θ для различных значений параметра q . При наклонном распространении поглощение необыкновенных мод больше, чем для обыкновенных, по мере увеличения параметра q и с приближением угла распространения к 90° поглощение необыкновенных волн становится максимальным. Поглощение НО-волн для $q \approx 0.3$, будет, очевидно, значительным в достаточно узком интервале углов, близко примыкающих к 90° .

Поглощение волн на более высоких гармониках $s > 2$ и $n_j \sim 1$ очень незначительно, так как $\Phi_j \sim \beta_T^{2s-4}$. На рис. 6д дифференциальный спектр стимулированных потоков на $2\omega_{ce}$ также имеет широкий энергетический диапазон.

в) $\beta \approx 80^\circ$; $\varphi \approx 75^\circ$; $q \approx 1$ (рис. 3в). Дипольная антенна ориентирована практически вдоль магнитного поля, при этом все резонансные частицы, регистрируемые спектрометром СФ-3М на циклотронных гармониках $s\omega_{ce}$ ($s = 1, 2, 3, 4, 5$), были подвержены наиболее сильному возмущению в некоторой цилиндрической области вокруг дипольной антенны с радиусом поперечного сечения ~2 - 3 м и длиной ~25 м. Это область, в которой силы высокочастотного давления создали сильно разреженную оболочку на время действия импульса излучения. Распределение поля в этой области близко к поперечной (по отношению к оси антенны) электромагнитной моде, характерная амплитуда электрического поля на расстоянии ~2.0 м от антенны порядка 10 в/м.

Можно сказать, что в данном случае мы имеем дело с фактом регистрации взаимодействия электронов с волноводными модами (ТЕМ-модами). Возмущения электронных потоков на ω_{ce} различ-

ными другими модами электромагнитных колебаний незначительны прежде всего из-за перпендикулярности главного лепестка диаграммы направленности к магнитному полю, и поэтому результаты расчетов коэффициентов поглощения, приведенные для двух предыдущих случаев, неприменимы. На рис. 3в представлены возмущения резонансных потоков электронов, отчетливо прослеживаемые до пятой гармоники гирочастоты. Возмущения на первых двух гармониках более значительны, чем в двух предыдущих случаях, прослеживается и характер уменьшения максимальной возмущенности с ростом номера гармоники s . На рис. 6е приведены спектры возмущений потоков электронов для первых трех гармоник. Этот случай интересен прежде всего тем, что область взаимодействия электронных пучков с ТЕМ-модами представляет собой нерегулярный волновод и является своеобразной аналогией СВЧ генератора, основанного на индуцированном циклотронном излучении электронов. Гибкую электродинамическую систему можно отнести к классу мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) и о возможностях ее реализации

можно судить только в ходе проведения специальных экспериментов.

3. СПЕКТРЫ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГАРМОНИКАХ ГИРОЧАСТОТЫ ω_{ce}

При описании изменения спектров потоков электронов (функции распределения) во внешнем электромагнитном поле высокой частоты необходимо прежде всего определить положение резонансной области поглощения мощности излучения в каждом из рассматриваемых случаев, и, исходя из этого, сделать правильный вывод о характере излучаемого спектра – монохроматично ли излучение или в некоторой области пространства спектр шумовой. При рассмотрении взаимодействия электронов с НО-волной можно считать, что зарегистрированные резонансные электроны были ускорены полем волны в некоторой цилиндрической области вдоль силовых линий магнитного поля с радиусом поперечного сечения приблизительно равным радиусу вращения ускоренного электрона в момент регистрации спектрометром. К этому следует добавить широкую

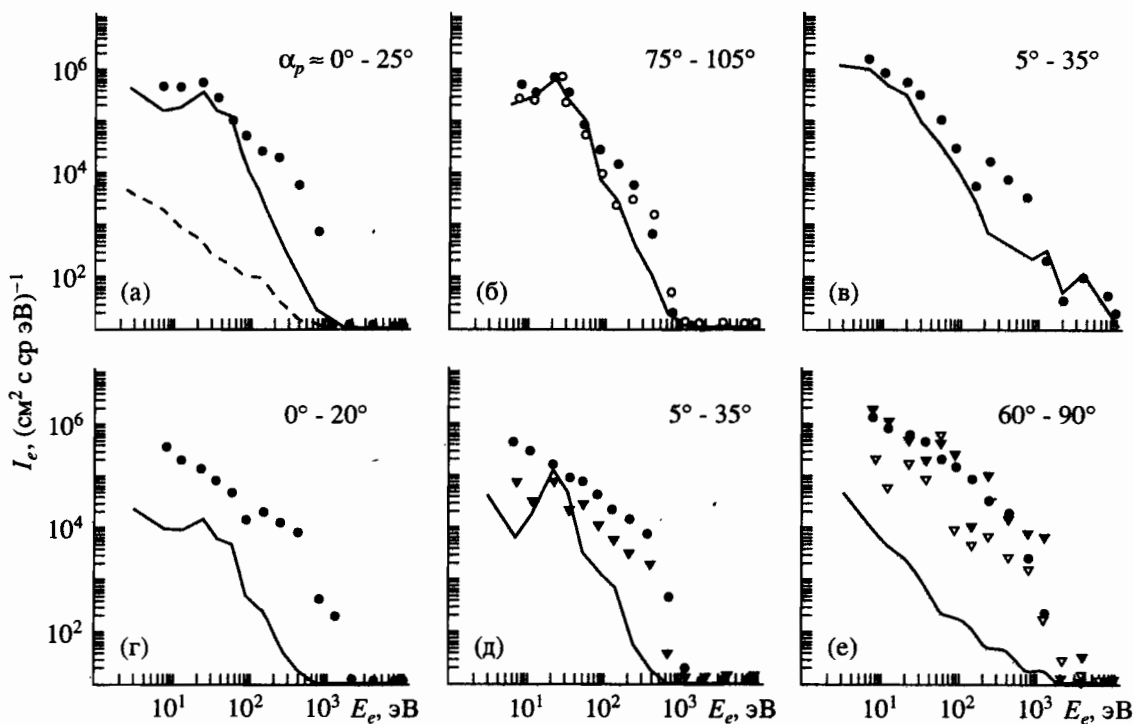


Рис. 6. Спектры возмущений дифференциальных потоков электронов.

Темные кружки – возмущения потоков на частоте f_{ce} , темные треугольники – возмущения потоков на $2f_{ce}$, светлые треугольники – возмущения на $3f_{ce}$; на спектре б светлые кружки – возмущения потоков на частоте f_{ce} при излучении Х-моды, темные – при излучении Z-моды. Штриховая кривая на спектре а – фон прибора, на всех спектрах сплошная ломаная кривая – невозмущенный спектр потоков электронов на рассматриваемом участке полета спутника; а, б – 27.I.1987, виток 554, $L_{dip} \approx 38^\circ - 44^\circ$, в – 21.XII.1986, виток 43, $L_{dip} \approx 72^\circ - 78^\circ$, г – 30.I.1987, виток 675, $L_{dip} \approx 61^\circ - 67^\circ$, д – 30.I.1987, виток 675, $L_{dip} \approx 45^\circ - 52^\circ$, е – 21.XII.1986, виток 43, $L_{dip} \approx 27^\circ - 35^\circ$.

апертуру пучка волн взаимодействующих с электронами на первых двух циклотронных гармониках, а следовательно и разные времена ускорения электронов с момента включения поля излучения до момента регистрации. Взаимодействие электронов с НО-волной при почти продольном ее распространении начинается на расстояниях в несколько длин волн, что представляет собой дальнюю зону излучения дипольной антенны и описание этого взаимодействия будет достаточным для случая монохроматического излучения в рамках линейной теории электронного циклотронного резонанса.

Взаимодействие электронов с обыкновенными модами излучения возможно при наклонной ориентации дипольной антенны к магнитному полю в промежуточной зоне излучения на расстояниях порядка длины антенны h . В этой области излучение является шумовым в некотором интервале частот $\Delta\omega_0$ и все гармоники из этого спектра испытывают практически одинаковое циклотронное затухание. Описание изменения функции распределения в этом случае возможно в рамках квазилинейного приближения. При рассмотрении некоторых конкретных вопросов, связанных с ЭЦ-нагревом ионосферной плазмы, большое значение представляют вопросы, связанные с поглощением ВЧ-мощности основной компонентой плазмы или малой группой быстрых электронов. Возвращаясь к рис. 6 и рассматривая спектры возмущений электронных потоков, которые наблюдаются в широком интервале энергий от ~ 0.01 кэВ до ~ 1 кэВ, можно сделать вывод, что:

– преимущественное поглощение ВЧ-мощности происходит на тепловой компоненте ионосферной плазмы, при этом следует отметить некоторую “маскирующую” роль невозмущенного спектра электронных потоков.

На рис. 6в возмущения потоков наблюдаются в интервале энергий от ~ 0.1 до ~ 1 кэВ, однако, на наш взгляд, это не противоречит выводу о преимущественном поглощении мощности тепловой компонентой. Некоторая малая часть мощности поглощается группой энергичных электронов, удовлетворяющих резонансному условию (1) за счет вклада доплеровской поправки $k_0^{\parallel} v^{\parallel}$.

В некотором смысле исключением является лишь случай, представленный на рис. 6б. На нем приведены два возмущенных спектра на частотах вблизи резонансного усиления мощности излучения Z- и X-моды. В первом случае часть мощности терялась в результате черенковского поглощения на быстрых электронах, а во втором к уже описанным источникам потерь добавилась еще и трансформация в бернштейновские моды с последующим поглощением группой энергичных электронов.

ВЫВОДЫ

К числу основных результатов этой работы можно отнести следующие:

1) наблюдается существенное различие циклотронных резонансов на первой гармонике ω_{ce} при значениях параметра $q < 1$ и $q > 1$, проявляющееся как в различной степени поглощения электромагнитных мод, так и в особенностях характеристик излучения вблизи антенных резонансов;

2) экспериментальное подтверждение существования механизма ускорения электронов по продольной к магнитному полю составляющей скорости на первой гармонике ω_{ce} при квазиперпендикулярном распространении обыкновенных мод;

3) отсутствие наблюдаемых резонансов электронных потоков на гармониках $s \geq 2$ при малых значениях параметра q ($q \ll 1$);

4) обнаружение зависимости резонансных возмущений потоков электронов на гармониках $s\omega_{ce}$ от ориентации дипольной антенны к магнитному полю Земли;

5) при ориентации дипольной антенны вдоль силовых линий магнитного поля становятся возможными механизмы взаимодействия электронов с сильными волноводными модами, при которых наблюдаются резонансы до пятой гармоники ω_{ce} ;

6) наблюдается преимущественное поглощение ВЧ-мощности основной компонентой ионосферной плазмы, а при определенных значениях параметра q , углов θ и α , некоторая часть мощности поглощается малой группой энергичных частиц.

В заключение авторы выражают благодарность научному руководителю эксперимента Ю.И. Гальперину и Ф.К. Шуйской за постоянное внимание и поддержку, а также Ю.В. Чугунову и В.И. Сотникову за проявленный интерес и ценные замечания при обсуждении результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shuiskaya F.K., Galperin Yu.I., Serov A.A. et al.* Resonant Heating of the Ionospheric Plasma by Powerful Radiopulses Aboard the Intercosmos-19 and Cosmos-1809 Satellites // Planet Space Sci. 1990. V. 38. № 2. P. 173 - 180.
2. *Серов А.А., Гальперин Ю.И., Лисаков Ю.В., Шуйская Ф.К.* Локальное ускорение электронов около спутниковой плазмы радиоизлучением мощного бортового передатчика // Космич. исслед. 1985. Т. 23. Вып. 3. С. 431 - 443.
3. *James H.G.* Sounder-Accelerated Particles Observed on ISIS // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. № A5. P. 27.
4. *Кинг Р., Смит Г.* Антенны в материальных средах. М.: Мир, 1984.
5. *Galejs J.* New Fields of a Cylindrical Antenna // R. Sci. 1968. V. 3. № 9.

6. Суворов Е.В., Фрайман А.А. О циклотронном поглощении на первой гармонике при квазиперечном распространении // Изв. Вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20. № 1. С. 67.
7. Голант В.Е., Пилюя А.Д. Линейная трансформация и поглощение волн в плазме // УФН. 1971. Т. 104. С. 413.
8. Ахиезер А.И., Половин Р.В., Ахиезер И.А. и др. Электродинамика плазмы. М.: Наука, 1974.
9. Андронов А.А., Железняков В.В., Петелин М.Н. О кинетической неустойчивости однородной магнитоактивной плазмы // Изв. Вузов. Радиофизика. 1964. Т. 7. № 2. С. 251.
10. Железняков В.В. О гирорезонансном излучении и поглощении в равновесной магнитоактивной плазме // Изв. Вузов. Радиофизика. 1964. Т. 7. № 1. С. 67.

Electron Acceleration at Electron Cyclotron Frequency Harmonics under the Effect of Radio-Frequency Emission from the *Kosmos-1809* Satellite

N. V. Baranets, V. V. Afonin, V. A. Gladyshev, G. P. Komrakov, and G. V. Vasilev

Different mechanisms of acceleration of ionospheric plasma electrons by the powerful radio-frequency (RF) emission of a space-borne topside sounder transmitter were investigated at electron cyclotron frequency harmonics. Using a charged-particle wide-aperture spectrometer to detect pitch-angle distribution from 0° to 180° , the electron acceleration along the electron velocity component longitudinal to the magnetic field was discovered. To analyze the dependence of accelerated-electron intensity on emission frequency at various angles of dipole antenna orientation to the magnetic field and at varying parameter $q = \omega_{pe}^2 / \omega_{ce}^2$, estimations of absorption coefficients of the ordinary (O-) and extraordinary (E-) mode were made. This is the first observation of the interaction of electron beams with wave-guide modes (TEM-modes) at cyclotron harmonics in a region around a dipole antenna oriented along the magnetic field.