

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн

На правах рукописи

ПЛОТКИН Валерий Викторович

О НЕКОТОРЫХ ЭФФЕКТАХ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ
МОЩНЫХ РАДИОВОЛН В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

(01.04.03 - радиофизика, включая квантовую радиофизику)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 1976

Работа выполнена в Институте геологии и геофизики Сибирского отделения АН СССР

Научный руководитель - доктор физико-математических наук И.М.ВИЛЕНСКИЙ

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук А.В.ГУРЕВИЧ

кандидат физико-математических наук Ю.Н.ЧЕРКАШИН

Ведущее предприятие - Научно-исследовательский радиофизический институт (г. Горький)

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 1976 г. в ____ час. на заседании Совета Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Академии наук СССР в конференц-зале. Адрес: 142092, Московская область, Подольский район, п/о Академгородок, ИЗМИР АН СССР.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИР АН СССР.

Автореферат разослан " ____ " _____ 1976 г.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

О.П.КОЛОМИЙЦЕВ

Актуальность и цель работы. Нижняя ионосфера играет существенную роль в распространении радиоволн почти всех диапазонов. В то же время характеристики этой области известны далеко не в полной мере. Устранение указанного недостатка связано с совершенствованием диагностики нижней ионосферы. В частности, это относится и к методам, основой которых являются различные нелинейные эффекты при распространении радиоволн. В подобной ситуации весьма актуально дальнейшее изучение особенностей распространения мощных радиоволн в нижней ионосфере. С другой стороны, исследование этих особенностей в связи с ростом в последние годы мощности используемых радиопередатчиков приобретает непосредственное практическое значение.

Вследствие сравнительно большой величины частоты соударений электронов в нижней ионосфере основную роль играет столкновительная (нагревная) нелинейность [1]. Хотя этот вид нелинейности известен еще с 30-х годов, связанные с ним явления изучены пока недостаточно. В частности, нелинейное взаимодействие радиоволн в ионосфере исследовано по существу лишь в однородной или квазиоднородной среде (в рамках геометрической оптики; впрочем, и здесь отсутствуют конкретные расчеты для реальных ситуаций).

В настоящей работе показано, что возмущения, вызываемые мощными волнами в плазме, могут заметно менять степень неоднородности среды. В ряде случаев образование искусственных неоднородностей в ионосфере существенно определяет характер нелинейного взаимодействия радиоволн. Так, взаимодействие мощных радиоволн с одинаковыми несущими частотами в большинстве случаев приводит к образованию искусственных квазипериодических неоднородностей с характерным масштабом порядка длины волны. Возникновение таких неоднородностей в ионосфере обуславливает резонансный характер взаимодействия радиоволн с одинаковыми несущими частотами. Наиболее часто встречающиеся случаи: нелинейное взаимодействие падающей и отраженной от ионосферы волн; взаимодействие нормальных составляющих мощной волны в магнитоактивной ионосфере и т.п. Следует отметить, что образование искусственных квазипериодических структур в ионосфере резонансным образом скажется и на распространении других слабых волн в возмущенной области.

При взаимодействии радиоволн с существенно разными несущими частотами (нерезонансном взаимодействии) образуются искусственные неоднородности с масштабом порядка длины затухания волн в

плазме. Если при этом одна из волн — слабая достаточно низкой частоты, то при исследовании ее распространения в ионосфере, возмущаемой другой волной — более мощной и высокочастотной, нельзя пренебрегать образованием и таких искусственных неоднородностей. Это явление может заметно влиять на просачивание волн низкочастотного диапазона во внешнюю ионосферу.

Характер изменений обсуждаемых искусственных возмущений плазмы с течением времени, их установление и релаксацию можно выяснить при изучении распространения мощных радиосигналов. С другой стороны, исследование распространения мощных радиосигналов в ионосфере представляет существенный практический интерес.

Рассмотрение указанного круга вопросов и выяснение роли искусственных неоднородностей при нелинейном взаимодействии радиоволн в нижней ионосфере являлось целью данной работы.

Научная новизна работы состоит в постановке и решении ряда задач нелинейного взаимодействия радиоволн в ионосфере, существенно определяемого образованием в области взаимодействия искусственных плазменных неоднородностей.

Практическая ценность работы заключается в полученных оценках влияния столкновительной нелинейности на ионосферное распространение радиоволн. Примененные в работе методы учета влияния нелинейности могут явиться основой при соответствующих расчетах на реальных радиотрассах. Полученные в работе результаты также свидетельствуют о целесообразности постановки новых экспериментов по изучению свойств нижней ионосферы.

Апробация работы. Результаты работ, составивших содержание диссертации, докладывались на X Всесоюзной конференции по распространению радиоволн (г. Иркутск, 1972 г.), XI Всесоюзном симпозиуме по дифракции и распространению волн (г. Зреван, 1973 г.), XI Всесоюзной конференции по распространению радиоволн (г. Казань, 1975 г.), на научных семинарах в ИЗМИР АН СССР (г. Москва, 1975 г.), в НИРФИ (г. Горький, 1975 г.) и в ИГиГ СО АН СССР (г. Новосибирск, 1969–75 гг.).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 131 страницу основного текста, 33 рисунка, 8 таблиц и библиографию из 85 наименований.

Краткое содержание работы. Во введении кратко приводится история вопроса о нелинейных явлениях при распространении радиоволн в ионосфере и указываются основные задачи работы.

В первой главе, состоящей из трех параграфов, исследуются характеристики искусственных неоднородностей в нижней ионосфере в случаях, когда воздействием отраженной волны можно пренебречь. Вследствие поглощения падающей на ионосферу мощной волны нагрев плазмы в ее поле оказывается неоднородным. В этих условиях в нижней ионосфере появляются области с относительно резким изменением параметров с высотой (искусственные резкие градиенты).

В § 1 приводятся оценки, показывающие, что параметры таких искусственных неоднородностей в нижней ионосфере могут быть не меньше параметров естественных неоднородностей. В частности, резкий ход ионосферных параметров с высотой возникает в слое, в котором поглощается необыкновенная компонента мощной радиоволны при соблюдении условия гирорезонанса.

§ 2 посвящен количественному исследованию резких искусственных градиентов эффективной частоты соударений, вызываемых мощными радиоволнами частоты $\omega \sim \omega_H$ в нижней ионосфере. При таких частотах основные возмущения ионосферных параметров возникают в нижней части слоя на высотах меньше 100–110 км. Поэтому влиянием регулярной отраженной волны (из-за поглощения она будет слабой) на параметры возмущений можно пренебречь. Вследствие того, что возмущаемый слой оказывается толстым в сравнении с длиной волны, будет слабым и отражение мощной волны от создаваемых ею искусственных градиентов.

При таких предположениях для конкретных моделей нижней ионосферы на ЭВМ были осуществлены расчеты параметров возмущенного слоя в стационарном случае в зависимости от частоты и мощности волны, для обеих магнитоионных компонент. Показано, что при эффективных мощностях ~ 1 –100 Мвт толщина возмущенного слоя довольно слабо зависит от мощности воздействующей волны (эффект насыщения). Более существенной является зависимость этой толщины от частоты волны и ее поляризации. Наиболее резкие искусственные градиенты эффективной частоты соударений образуются в ночной ионосфере при воздействии мощной необыкновенной волной в случае гирорезонанса: при эффективной мощности $\lesssim 100$ Мвт возмущенная частота соударений в области высот с 95 до 100 км спадает в $\lesssim 20$ раз. В дневной ионосфере искусственные градиенты менее выражены во всех случаях из-за большего поглощения.

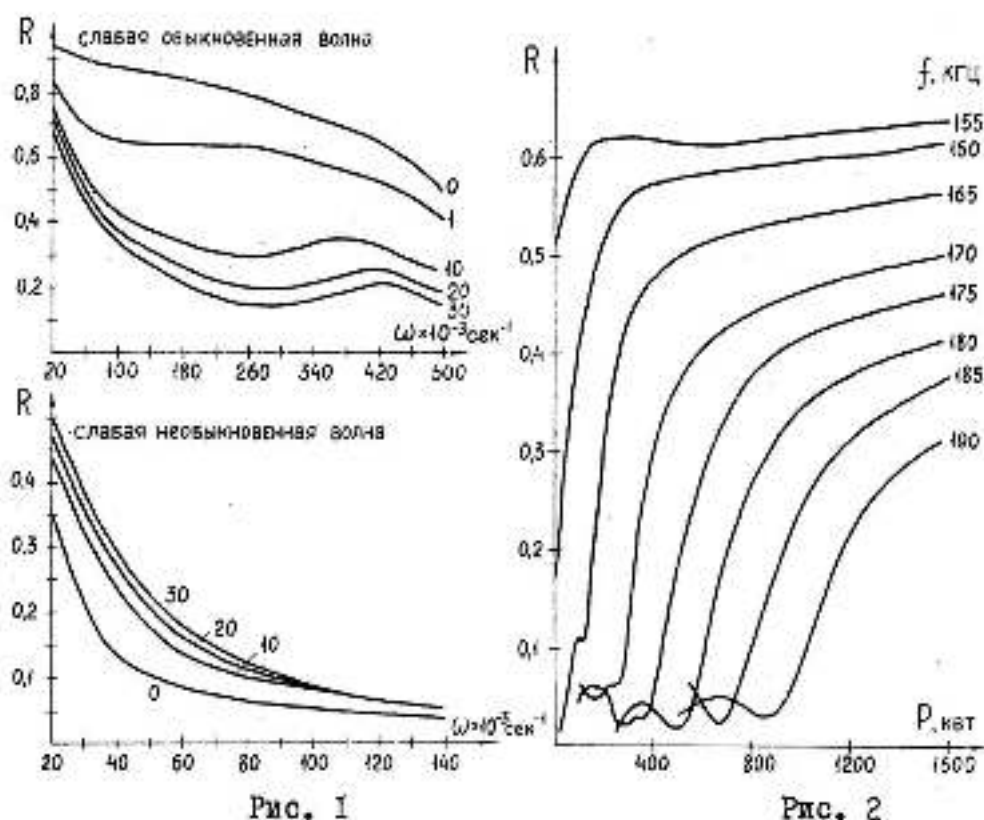
В § 3 рассматривается возникновение искусственных неоднородностей при длительном воздействии мощной волной ($t > \tau_N$, τ_N — время жизни электрона), когда существенны возмущения

электронной плотности. Приводятся результаты расчета искусственных градиентов для ночной модели ионосферы (высоты > 80 км) в стационарном случае в зависимости от частоты, мощности и поляризации волны. Показано, что обсуждаемые характеристики этих градиентов аналогичны рассмотренным в § 2. Однако вследствие более сильного затухания мощной волны при наличии возмущений N электронная температура в глубине плазмы меньше, чем в соответствующих случаях в § 2. При этом резкие искусственные неоднородности возникают на меньших высотах $\sim 90-95$ км.

Можно также отметить, что, если $\epsilon \gg \frac{4\pi\sigma}{\omega}$, то при квазипродольном распространении мощной волны самовоздействие и характеристики возмущений, вызываемых в ионосфере обыкновенной волной частоты ω и необыкновенной — той же мощности, но частоты $\omega + 2\omega_H$, приблизительно одинаковы.

Во второй главе, состоящей из четырех параграфов, рассматриваются вопросы нелинейного взаимодействия радиоволн в ионосфере, связанного с образованием искусственных плазменных неоднородностей.

В § 4 исследуется влияние резких градиентов, вызываемых мощной волной (см. I главу) в нижней ионосфере, на распространение низкочастотных радиоволн с длиной волны $\lambda \approx 5-10$ км. Для таких волн характерные размеры неоднородностей $\approx \lambda$ и, очевидно, влияние их может быть существенным. Это подтверждено результатами численного счета коэффициента отражения R слабых волн в диапазоне $\omega \sim 10^4-10^6$ сек $^{-1}$ от возмущенной и невозмущенной ночной ионосферы. Особенно наглядно характер влияния резких искусственных градиентов проявляется при продольном распространении относительно магнитного поля (это важно также для явления просачивания низкочастотных волн во внешнюю ионосферу). Коэффициент отражения обыкновенной составляющей слабой волны уменьшается при наличии возмущений в ионосфере, а необыкновенной — увеличивается. Для случая, когда искусственные градиенты наиболее заметны (при воздействии мощным "гироспередатчиком"), результаты расчета можно видеть из рис. I. Цифры у кривых пропорциональны мощности возмущающей волны. Подобные изменения R обусловлены различием характера отражения маггиитоионных составляющих. Необыкновенная волна при продольном распространении просачивается через ионосферу: она частично отражается лишь на достаточно низких частотах исключительно из-за неоднородности ионосферного слоя (в этом



случае $\epsilon \gg 1$). При увеличении степени неоднородности коэффициент отражения ее заметно возрастает.

Обыкновенная составляющая имеет точку отражения $\epsilon = 0$, и искусственные градиенты существенно сказываются лишь на таких частотах, при которых область $\epsilon = 0$ расположена выше этих градиентов, а характерный масштаб последних $\lesssim \lambda$. Выход первого максимума стоячей волны с ростом ω из возмущенной области, резко ограниченной сверху по высоте, сопровождается уменьшением поглощения слабой волны в слое и проявляется в характерном максимуме в ходе $R(\omega)$ (рис. 1). Таким же образом описывается отражение от возмущенной ионосферы каждой из рассматриваемых слабых волн при распространении под углом к магнитному полю (в случаях, когда не существенен эффект просачивания). Необходимо подчеркнуть, что рассмотренные эффекты демпфируются общим ростом поглощения в нагретой части слоя. Изменения R слабой волны в зависимости от частоты, мощности, поляризации и длительности импульса воздействующей волны (т.е. в зависимости от характера искусственных градиентов) согласуются с описанной выше картиной явления. В дневной ионосфере указанные эффекты менее выражены из-за большого поглощения.

В § 5 рассматривается влияние обсуждаемых искусственных возмущений в нижней ионосфере на распространение более коротких слабых волн ($f \sim 1-10$ Мгц). Численно рассчитывается стационарное изменение поглощения L в этом диапазоне в дневной и ночной ионосфере в зависимости от частоты, мощности и поляризации возмущающей волны.

Естественно было ожидать, что наибольший эффект будет наблюдаться в тех случаях, когда возмущения в плазме максимальны: либо при низких частотах воздействующей волны, если она обыкновенная, либо в случае гирорезонанса, если она — необыкновенная. Однако оказалось, что наряду с локальной величиной возмущений существенное значение также имеет толщина нагреваемого слоя. Увеличение поглощения слабых волн L с ростом толщины возмущаемого слоя приводит к тому, что максимальный эффект наблюдается при несколько иных значениях частоты воздействующей волны, чем ожидалось. В частности, при воздействии на ионосферу необыкновенной волной в случае гирорезонанса увеличение поглощения L минимально, поскольку возмущенный слой при $\omega = \omega_H$ наиболее тонок.

Заметное возрастание поглощения в ночной ионосфере существенно сказывается на частотах $f < 5$ Мгц (нормальное падение). В наиболее благоприятном случае при мощности воздействующей волны ~ 100 Мвт на частоте $f \sim 1$ Мгц поглощение возрастает с ~ 2 дБ (в невозмущенной ионосфере) до ~ 20 дБ, на частоте $f \sim 5$ Мгц оно изменяется лишь на ~ 1 дБ. В дневной ионосфере при возмущении частоты соударений возрастание поглощения заметно до $f \sim 10$ Мгц.

В последующих параграфах второй главы рассматриваются резонансные эффекты при взаимодействии радиоволн, связанные с образованием в ионосфере искусственных квазипериодических неоднородностей. Последние возникают, например, в области ниже точки отражения мощной волны, что связано с неравномерным нагревом плазмы в узлах и пучностях имеющейся здесь стоячей волны. Количественные характеристики таких неоднородностей в реальной нижней ионосфере исследуются в третьей главе при решении задачи об отражении мощных волн. С учетом того обстоятельства, что в данном случае возмущения ионосферных параметров содержат пространственные гармоники с периодом $\lambda/2$ (λ — длина мощной волны), в § 6 аналитически рассматривается вопрос о резонансном влиянии таких искусственных неоднородностей на распространение слабой волны в

возмущаемой зоне. Показывается, что, если длина волны λ_c последней приближается к λ (в случае продольного распространения вдоль структуры), то эта слабая волна может испытывать сильное отражение при сколь угодно малой величине возмущений. В частности, если существенны лишь возмущения диэлектрической проницаемости, коэффициент отражения волны $R = \delta / L|\delta|$, где δ — амплитуда пространственной гармоники ϵ . Такой коэффициент отражения создается возмущенным слоем толщины $L \sim \lambda / |\delta|$, если малы поглощение $\gamma L \sim \frac{4\pi\sigma}{\omega\epsilon} L \ll \lambda$, и расстройка $\Delta\lambda / \lambda \ll |\delta|$. Если же существенны лишь квазипериодические возмущения проводимости σ (с амплитудой β), отражение будет велико при $|\beta| \sim \gamma$, но в этом случае толщина отражающего слоя $L \sim \lambda / \sqrt{\gamma^2 - |\beta|^2}$ значительна. При $|\beta| \ll \gamma$ отражение мало из-за поглощения падающей на структуру слабой волны в относительно тонком слое $\sim \lambda / \gamma$. Однако изменение коэффициента поглощения этой волны может быть существенным. Все приведенные выше результаты справедливы при условии: $|\delta|, |\beta|, \gamma \ll 1$.

В магнитоактивной ионосфере возможно образование пространственных квазипериодических неоднородностей при взаимодействии мощных нормальных волн близких частот $\omega_1 \sim \omega_2$. Возникающие при нагревании такими волнами возмущения среды модулированы по времени разностной частотой. Предельный случай резонансного взаимодействия ($\omega_1 = \omega_2$) нормальных составляющих мощной волны с произвольной поляризацией (самодействие в анизотропной ионосфере) рассматривается в § 7. В случае резонанса вызываемые в среде возмущения стационарны, максимальны и соответствуют пространственным квазипериодическим неоднородностям электронной температуры с разностным волновым вектором. Последние можно интерпретировать также как следствие различия фазовых скоростей нормальных составляющих (и вызываемого этим изменения эллипса поляризации мощной волны при ее распространении) и анизотропии проводимости. Это объясняет, почему квазипериодические неоднородности отсутствуют, как следует из расчета, при продольном (нет анизотропии проводимости в поперечных направлениях) или поперечном ($\int_{V_1} \vec{E}_{2,1} = 0$) распространении относительно магнитного поля. Аналитическое рассмотрение эффекта проводимости в приближении слабого поглощения и малой нелинейности. Поглощение нормальных составляющих при наличии искусственных неоднородностей существенно возрастает. Это связано с тем, что при нагревном механизме нелиней-

ности "горбы" квазипериодических неоднородностей частоты соударений возникает в областях с максимальными омическими потерями энергии волны. В результате эти потери еще более увеличиваются, что эквивалентно возрастанию коэффициентов поглощения обеих нормальных составляющих. При расстройке от резонанса ($\omega_1 \neq \omega_2$) амплитуда квазипериодических возмущений уменьшается из-за появления временной модуляции, и это приводит к ослаблению указанного эффекта. Расчет показал, что такое резонансное взаимодействие эквивалентно эффективному увеличению влияния каждой составляющей на другую. В поляризационных соотношениях это соответствует появлению множителя 2, а в уравнениях для амплитуд - коэффициента $(1+b)$ при перекрестных членах (описывающих влияние волн друг на друга). Коэффициент b зависит от угла θ , под которым волна распространяется по отношению к магнитному полю и в условиях резонанса дается выражением:

$$b = \frac{\text{ctg}^2 \theta}{\text{ctg}^2 \theta + [1 + \gamma^2(1 + \text{ctg}^2 \theta)][1 + 4\gamma^2 \text{ctg}^2 \theta(1 + \text{ctg}^2 \theta)]}, \quad \gamma^2 = \frac{(1-v)^2}{u} = \frac{(\omega^2 - \omega_0^2)^2}{\omega^2 \omega_H^2}$$

При $\gamma \ll 1$ имеем $b_{\max} \sim 1$, при $\gamma \gg 1$ - $b \ll 1$. Условие $\gamma \ll 1$ выполняется в области $u > 1$, $v < 1$ (рассматривается область вдали от точек отражения волн, где $n \gg \omega$). Отсюда следует, что в диапазоне $\omega < \omega_H$ (на высотах > 80 км для частот $\omega \lesssim 10^7$ сек⁻¹) можно ожидать заметный эффект.

Характеристики квазипериодических неоднородностей в области ниже точки отражения мощной волны определяются при решении задачи об отражении, которая представляет существенный самостоятельный интерес. В третьей главе, состоящей из четырех параграфов, численными методами исследуется отражение мощных радиоволн частоты $f < 200$ кгц от нижней ионосферы.

В § 8 обсуждаются физические явления, которые могут иметь место при отражении мощных радиоволн: образование квазипериодических неоднородностей, сдвиг точки отражения, изменение коэффициента отражения, изменение критической частоты ионосферного слоя и полосы "просачивания" волн через него.

В § 9 решается задача об отражении мощной волны от ночного E-слоя на частоте, близкой к критической ($f_{кр} \sim 160$ кгц). Рассматривается нормальное падение обыкновенной волны на плоский плазменный слой с максимумом в зависимости электронной плотности от высоты для случая продольного распространения относительно магнитного поля. Верхнее граничное условие этой краевой задачи - условие излучения. Нижнее записывается в области ниже ионосферы

и соответствует представлению поля в виде комбинации падающей и отраженной волн. Уравнения Максвелла интегрируются на ЭМВ по высоте в направлении сверху вниз, затем находится коэффициент отражения R и амплитуда падающей волны E_0 . Вариацией положения верхнего граничного условия осуществляется проверка рассчитанных значений коэффициента отражения. Методика расчета проверялась также на случаях, когда известно точное решение задачи об отражении (для слоя без поглощения с параболической зависимостью электронной плотности от высоты). Точность полученных значений $R \sim 10^{-3} - 10^{-4}$. Результаты расчета R в обсуждаемом случае видны из рис. 2 (в этой главе везде рассматриваются стационарные возмущения частоты соударений и электронной плотности). Воздействию мощной волны в нижней ионосфере приводит к увеличению максимальной электронной плотности и критической частоты слоя, изменению полосы "просачивания". Это является причиной существенного возрастания коэффициента отражения уже при сравнительно небольших эффективных мощностях ~ 1 Мвт. Данное обстоятельство делает целесообразным проведение соответствующего эксперимента, так как последний мог бы служить неплохим критерием правильности имеющихся представлений о механизме возникновения возмущений электронной плотности. Обсуждается влияние квазипериодических неоднородностей в области ниже точки отражения на величину коэффициента отражения мощной волны. В рассматриваемом случае амплитуда пространственных колебаний электронной температуры $T_e \sim T$.

В § 10 исследуется отражение от ночной ионосферы мощных радиоволн более низкой частоты, далекой от $f_{кр} E$: в диапазоне 20 - 120 кгц. Как и в § 9, рассматривается нормальное падение волн на слой в случае продольного распространения обыкновенной компоненты относительно магнитного поля. Указанным выше способом рассчитаны модуль коэффициента отражения и изменение фазового запаздывания в слое в зависимости от эффективной мощности волны (в интервале значений 0,1-10 Мвт). В связи с имеющимися предположениями [1] относительно характера зависимости от электронной температуры частоты соударений электронов с молекулами воздуха в нижней ионосфере рассматривались две модели: $\nu \sim T_e^{1/2}$ и $\nu \sim T_e$. Определенное количественное различие (≈ 10 %) в поведении коэффициента отражения волны при увеличении ее мощности для указанных зависимостей $\nu(T_e)$ начинает сказываться при эффективных мощ-

ностях ≥ 5 Мвт. Показано, что модуль коэффициента отражения и фазовое запаздывание в слое в обсуждаемом случае уменьшаются при увеличении мощности волны.

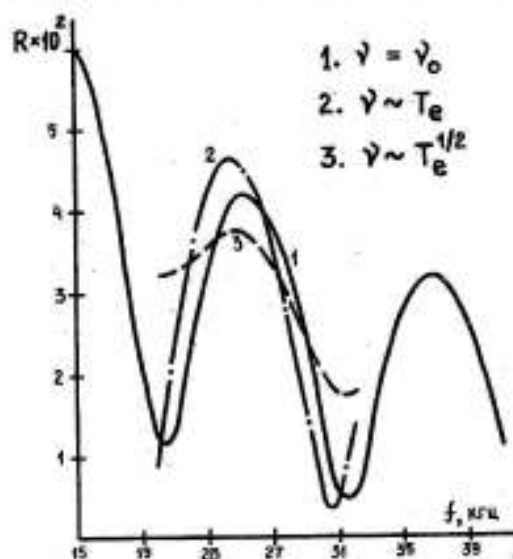


Рис. 3

жения слабых волн показывает, что последний осциллирует при изменении частоты в рассматриваемом диапазоне. Это связано с тем обстоятельством, что вследствие большой проводимости плазмы в данном случае отражение происходит на всех высотах тонкого нижнего слоя ионосферы, сравнимого по толщине с длиной волны. Показано, что характер осцилляций коэффициента отражения существенно зависит от вида профилей электронной плотности в самой нижней части ионосферы.

При исследовании частотной зависимости коэффициента отражения мощных радиоволн обнаружено, что характер изменения этих осцилляций R при увеличении мощности различен, если предполагать $\gamma \sim T_e$ или $\gamma \sim T_e^{1/2}$ (см. рис. 3). Это связано с уменьшением проводимости σ плазмы под действием мощной волны в первом случае и увеличении — во втором (т.к. в обоих случаях $\sigma \sim N(T_e)/\gamma(T_e)$).

Четвертая глава посвящена нестационарным процессам при воздействии мощными радиоволнами на ионосферу. Здесь исследуется влияние нелинейности на распространение в ионосфере мощных радиосигналов.

В § 12 рассматриваются нелинейные искажения в ионосфере радиосигналов, модулированных во времени по произвольному закону. При слабой нелинейности амплитудные искажения радиосигналов

В § II рассматривается отражение мощной обыкновенной волны от ночной ионосферы при нормальном падении на слой и поперечном распространении относительно магнитного поля в диапазоне 20–40 кгц. Этот случай (отражение от изотропной ионосферы) интересен тем, что изменение частотной зависимости коэффициента отражения при увеличении мощности радиоволн различно при предположениях $\gamma \sim T_e$ и $\gamma \sim T_e^{1/2}$.

Расчет коэффициента отра-

после прохождения слоя плазмы толщиной z дается выражением (фазовые искажения описываются аналогично):

$$A(z, t) = A_0(t_0) \left\{ 1 - \frac{\omega^2 - \gamma_0^2}{\omega^2 + \gamma_0^2} \frac{1 - e^{-2\gamma z}}{4} \frac{\delta \nu_0 \int_0^{\infty} A_0^2(t_0 - \tau) e^{-\delta \nu_0 \tau} d\tau}{E_p^2} \right\}, t_0 = t - \frac{z}{v}$$

Здесь $A_0(t)$ — соответствует первоначальной модуляции, v — групповая скорость, γ — коэффициент затухания. Рассмотрены искажения мощных радиоимпульсов различной формы, синусоидально модулированных радиоволн. Характер нелинейных искажений сигнала сравнивался с линейным расплыванием его вследствие дисперсии. При этом показано, что в нижней ионосфере наряду с дисперсией показателя преломления может быть существенной дисперсия показателя затухания. Получены выражения, описывающие линейные искажения сигнала с учетом дисперсии указанных величин. Вследствие того, что характерные временные масштабы "установления" линейных и нелинейных искажений в нижней ионосфере различны ($\tau_{\text{лин}} \approx 10^{-5} - 10^{-4}$ сек, $\tau_{\text{нел}} > 10^{-4}$ сек), сделан вывод о возможности раздельного изучения этих искажений в эксперименте.

В § 13 рассматривается распространение мощных радиосигналов с малой глубиной модуляции при сильной нелинейности $E > E_p$. Методом усреднения получены уравнения, описывающие распространение малых возмущений амплитуды и фазы на фоне, создаваемом мощной стационарной волной. Подобные радиосигналы распространяются с возмущенной групповой скоростью. Для синусоидально модулированных волн с малой глубиной модуляции выведены выражения для нелинейных амплитудных и фазовых искажений, совпавшие с полученными ранее иным способом (без учета группового запаздывания [1]). Кроме того, используемый метод позволил дополнительно определить индекс фазовой модуляции для произвольной частоты модуляции Ω (в [1] приводится выражение лишь при $\delta \nu \gg \Omega$).

В заключении кратко излагаются основные результаты проведенного исследования.

Основные итоги работы

I. Показано, что образование искусственных градиентов эффективной частоты соударений и электронной концентрации в нижней ионосфере существенно сказывается на распространении в возмущенной области слабых радиоволн низкой частоты $\omega \sim 10^4 - 10^6$ сек $^{-1}$ (в частности, на величине коэффициентов отражения от ионосферы и прохождения через нее).

2. На реальных ионосферных моделях исследованы изменения поглощения слабых радиоволн в диапазоне частот 1–10 Мгц при их распространении в "нагретой" ионосфере. Определены условия, когда эффект наиболее велик.

3. Показано, что взаимодействие нормальных составляющих мощной волны в магнитоактивной ионосфере существенно определяется образованием при нагреве плазмы пространственных квазипериодических неоднородностей с разностным волновым вектором.

4. Показано, что при отражении мощной волны от ночного E-слоя ионосферы на частоте, близкой к критической, ее коэффициент отражения существенно возрастает при сравнительно небольших значениях эффективной мощности ~ 1 Мвт.

5. Рассмотрено отражение от нижней ионосферы мощных радиоволн низкой частоты ~ 20 –100 кгц. Показано, что изучение частотной зависимости коэффициента отражения мощных радиоволн этого диапазона целесообразно при диагностике нижней ионосферы.

6. Изучен характер нелинейных искажений мощных радиосигналов при их распространении в ионосфере. Проведено сравнение нелинейных искажений с линейным расщеплением сигнала в нижней ионосфере вследствие дисперсии. Из этого сравнения следует возможность раздельного изучения таких искажений на практике.

Содержание диссертации изложено в публикациях [2–13].

Л и т е р а т у р а

1. А.В.Гуревич, А.Б.Шварцбург. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере, Наука, М., 1973
2. В.В.Плоткин. О распространении радиосигналов в нелинейной среде, Изв. ВУЗов. Радиофизика, 14, № 10, 1488–1492, 1971
3. В.В.Плоткин. О влиянии дисперсии поглощения в нижней ионосфере, Геомагнетизм и аэронавтика, 12, № 3, 557–559, 1972
4. В.В.Плоткин. О распространении радиосигналов в нелинейной среде, в сб. "Вопросы исследования нижней ионосферы", Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, II-20, 1972
5. И.М.Виленский, В.В.Плоткин. О влиянии искусственных градиентов в ионосфере на распространение в длинноволновом диапазоне, Геомагнетизм и аэронавтика, 13, № 3, 526–528, 1973
6. И.М.Виленский, В.В.Плоткин. Об отражении мощных радиоволн от

нижней ионосферы, Изв. ВУЗов. Радиофизика, 16, № 6, 886-891, 1973

7. В.В.Плоткин. Об одном случае отражения длинных радиоволн от ионосферы, в сб. "Вопросы исследования нижней ионосферы и геомагнетизма", Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 42-45, 1974
8. В.В.Плоткин. Об отражении от ионосферы мощных радиоволн ДВ-диапазона, в сб. "Вопросы исследования нижней ионосферы и геомагнетизма", Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 46-56, 1974
9. А.А.Капельзон, В.В.Плоткин. О нелинейном взаимодействии нормальных волн в магнитоактивной плазме со столкновениями, Изв. ВУЗов. Радиофизика, 18, № 5, 625-629, 1975
10. В.В.Плоткин. О поглощении радиоволн в нижней ионосфере, возмущенной мощным радиопередатчиком, в сб. "XI Всесоюзная конференция по распространению радиоволн", тезисы докладов, часть I, Казань, КГУ, 87-88, 1975
11. А.А.Капельзон, В.В.Плоткин. К вопросу о нелинейном взаимодействии нормальных волн в анизотропной ионосфере, в сб. "XI Всесоюзная конференция по распространению радиоволн", тезисы докладов, часть I, Казань, КГУ, 81-83, 1975
12. В.В.Плоткин. Об отражении радиоволн от квазипериодических неоднородностей среды, в сб. "Вопросы исследования нижней ионосферы и геомагнетизма", Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 68-72, 1975
13. В.В.Плоткин. О нелинейном взаимодействии радиоволн в нижней ионосфере, в сб. "Вопросы исследования нижней ионосферы и геомагнетизма", Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 20-68, 1975

Технический редактор *Л. А. Панина*

Подписано к печати 30.УП. 1976г. МН 07445.

Бумага 60x84/16. Печ.л. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9.

Тираж 180.

Заказ 197.

Институт геологии и геофизики СО АН СССР

Новосибирск, 90. Ротапринт.