Том 109, вып. 2

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

551.510.535(023)

ИЗМЕНЕНИЕ ИОНОСФЕРЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ *) РАДИОВОЛН

У. Ютло, Р. Коэн

Мощные наземные радиопередатчики используются теперь для возмущения ионосферы с последующим изучением возникающих в ней изменений.

С помощью мощных радиоволн, направленных вертикально вверх, можно теперь вызывать в ионосфере заметные локальные возмущения. Эти возмущения ионосферы относительно кратковременны и самообратимы, с временами жизни порядка секунд, минут или часов, но не дней. Диаметр измененной области достигает порядка 100 км, а центр ее располагается на высоте между 250 и 350 км над поверхностью Земли. Эта область имеет форму сфероида, вытянутого вдоль линий геомагнитного поля.

Ионосфера — это область верхних слоев земной атмосферы, где входящие в ее состав газы частично (до 1%) ионизованы, в основном под влиянием солнечного излучения. Эта область электрически нейтральна. с равным количеством положительно и отрицательно заряженных частии. Отрицательно заряженные электроны, обладая меньшей массой, чем положительно заряженные ионы, являются теми частицами иносферы, которые наиболее сильно взаимодействуют с радиоволнами. Достаточно большая ионизация, оказывающая влияние на радиоволны, начинается в области (слое) D на высоте примерно 60 км, и концентрация ионизованных частиц увеличивается с высотой от области D к области E (рис. 1). Выше этих областей располагается слой F, где концентрация электронов и ионов достигает максимума, равного примерно 106 см-3 и расположенного на высоте около 300 км. Зависимость ионизации от высоты меняется со временем суток, временем года, с солнечной активностью, а также с широтой и долготой. Ионизованный слой между 200 и 400 км состоит в основном из равного количества ионов О+ и электронов. Эти заряженные частицы погружены в нейтральный газ с концентрацией 10⁸ см⁻³, состоящий в основном из частиц O2, O, N2 и He. Входящие в состав ионосферы

^{*)} William F. Utlaut, Robert Cohen, Modifying the Ionosphere with Intense Radio Waves, Science 174 (4006), 245 (1971). Перевод Н. И. Гинзбург, под редакцией А. В. Гуревича.

Д-р Уилльям Ф. Ютло является директором Института телекоммуникаций при Управлении телекоммуникаций министерства торговли США, Боулдер, Колорадо; д-р Роберт Коэн — консультант Аэрономической лаборатории в составе лабораторий для изучения околоземного пространства Национального управления океанографических и атмосферных исследований того же министерства.

частицы характеризуются температурами, которые выводятся из кинетической теории газов — речь идет о температуре ионов T_i , температуре электронов T_e и температуре нейтральных частиц T_n . Типичные значения для дневного времени на высоте примерно 300 км над Боулдер (Колорадо) равны: $T_i = 1000$ °K, $T_e = 2000$ °K и $T_n = 950$ °K, а для ночного времени: $T_i = 900$ °K, $T_e = 1200$ °K и $T_n = 900$ °K.

Отражение радиоволн различных частот от ионосферы позволяет осуществлять относительно дешевую связь на большие расстояния.



Рис. 1. а) Типичный профиль концентрации электронов в ионосфере для дневного (сплошная линия) и для ночного (штриховая линия) времени в средних широтах (на профиле видно расслоение на *D*-, *E*-, *F*1- и *F*2-слои); б) зависимость температуры нейтральных частиц от высоты в дневное время (по ^{1а}).

Ионосфера может также оказывать влияние на радиоволны, используемые при космической связи. Кроме того, радиоволны позволяют изучать ионосферу с Земли. В течение многих лет ионосферу изучают с помощью радио- и фотометрических методов, а также с помощью зондов.

С появлением ракет и спутников искусственно созданные в ионосфере возмущения используются как один из методов ее изучения. Эти возмущения возникают в результате введения в ионосферу химических веществ, от детонации при взрыве атомных бомб, а также под воздействием поднятых на ракетах небольших электронных ускорителей. Возможность проведения активных экспериментов, в которых можно временно изменять ионосферу с помощью мощных наземных радиопередатчиков, давно привлекала внимание исследователей. По сравнению с другими методами метод изменения ионосферы с помощью радиопередатчиков на ча-

стотах волн, взаимодействующих с ионосферой, представляется весьма привлекательным и «гигиеничным» в связи с тем, что его можно относительно легко контролировать, повторять и что вызываемые при этом изменения быстро обратимы. Такие изменения удобны при определении параметров, представляющих интерес для аэрономии, для применений в радиосвязи, использующей ионосферное отражение, а также для создания и изучения явлений неустойчивости в физике плазмы.

Развитие радиометодов изменения ионосферы совместно с радиои оптической техникой управления и регулировки возникающих возмущений дает возможность не только наблюдать ионосферную плазму, но и проводить более широкие эксперименты. Таким образом, «природную» илазму впервые можно в какой-то мере рассматривать как плазму лабораторную. Более того, эта «небесная плазменная лаборатория» имеет определенные преимущества по сравнению с обычной лабораторной плазмой. Одно из таких преимуществ — отсутствие границ и связанных с ними осложнений. С другой стороны, в ионосферную плазму, хорошо это или плохо, проникает геомагнитное поле, которое трудно изменять искусственно. В проведенных экспериментах по изменению ионосферы в ней возникает по крайней мере одна плазменная неустойчивость. Можно ожидать, что изучение искусственных неустойчивостей внесет вклад в понимание природы неоднородностей, которые естественным образом возникают в ионосфере. В самом деле, неустойчивость, которую можно теперь получить искусственно и которая вызывает ионосферные спорадические *F*-отражения (см. раздел «Экспериментальные результаты»), может оказаться идентичной естественной неустойчивости, связанной по крайней мере с некоторыми видами ионосферных неоднородностей.

Обсуждаемое здесь изучение ионосферных изменений связано в основном с областью ионосферы, известной как *F*-слой, лежащей на высоте от 150 до 400 км. Основным стимулом изучения изменения *F*-слоя послужили работы Гинзбурга и Гуревича ¹⁶ и Фарли². Фарли сначала обсуждал возмущение *F*-слоя (благодаря нагреву ионосферных электронов), которое могло бы возникнуть в процессе использования мощных радаров при наблюдении некогерентного рассеяния в ионосфере. Он нашел, что изменение электронной температуры под влиянием излучения с некогерентным рассеянием пренебрежимо мало даже на самых низких радиочастотах (42 *Мгц*), используемых в таких радарах. Таким образом, в процессе измерений температуры электронов методом некогерентного рассеяния не возникает заметного возмущения измеряемых параметров.

Фарли, однако, разумным образом перешел к вычислению того, каким образом можно вызвать заметные изменения в ионосферном F-слое с помощью радиопередатчиков, работающих на другой частоте волн, сильнее взаимодействующих с ионосферой, т. е. на частоте, находящейся в резонансе с самой высокой плазменной частотой колебаний F-слоя. (Электроны в плазме осциллируют с частотой, пропорциональной корню квадратному из локальной концентрации электронов, и отражают радиоволны на этой частоте. Эту частоту называют «электронной плазменной частотой». Максимальную электронную частоту ионосферной плазмы называют «критической» частотой или «частотой проникновения» fo для F-слоя. Критическая частота F-слоя является самой низкой радиочастотой, могущей проходить через ионосферу, и ее типичное значение лежит в области от 5 до 10 Мгц.) На основе своих вычислений как Фарли², так и Гуревич³ предсказали, что путем комбинирования достаточно мощных передатчиков и антенн можно в ночное время добиться увеличения электронной температуры вдвое. При этом и Фарли, и Гуревич исходили из предположения об отсутствии сильно поглощающего в дневное время *D*-слоя, который, по-видимому, может мешать проникновению излучения в F-слой *). (Тем не менее, как мы увидим, заметные изменения ионосферы наблюдались и в дневное время.)

Согласно Фарли² диффузия нагретых электронов вверх и вниз вдоль линий геомагнитного поля одновременно должна вызывать понижение электронной концентрации в соответствующей области, иными словами в ионосфере должно появиться «отверстие». Электроны движутся в основном по спирали вдоль линий магнитного поля и поэтому они могут диффундировать (с переносом тепла) скорее вдоль этих линий, чем поперек.

Более подробные вычисления нагрева ионосферы с учетом временной зависимости были выполнены Мельтцем и Ле-Левье ⁴. Они рассмотрели также рефракцию радиоволн в ионосфере в присутствии земного магнитного поля в предположении, что падающее излучение попадает в ионосферу с частотой, слегка превышающей зависящую от времени критическую частоту *F*-слоя. Практически большие радиопередатчики трудно настраивать и постоянно работать с ними на переменных частотах. Поэтому в экспериментах по изменению ионосферы сейчас работают

^{*)} В работе ³ расчет возмущений *T_e* и *N* проведен как для ночного, так и для дневного времени с учетом поглощения радиоволи в нижних слоях ионосферы. Возмущение ионосферы днем, согласно ³, примерно в два раза слабее, чем ночью. (Прим. ped.)

на относительно постоянной радиочастоте, обычно ниже критической. (Фактически работают на частотах, лежащих в области от частоты на 50% ниже до частоты на 20% выше критической.) Еще нет полного теоретического анализа для частот, сильно отличающихся от критической. Однако Томсон ⁵ рассмотрел этот вопрос, включив ионосферную рефракцию, но без учета влияния геомагнитного поля. Его результаты должны помочь в интерпретации экспериментальных данных.

Вскоре после того, как Фарли предложил эксперимент, Потемра ⁶ попытался осуществить нагрев ионосферы с помощью передатчика мощностью 40 квт на частоте 7,7 Мгц и с шириной диаграммы направленности антенны 12°. Однако чувствительность его системы оказалась неадекватной для детектирования изменений ионосферы. Сейчас имеются две более совершенные экспериментальные установки, с помощью которых можно вызывать заметные изменения ионосферы. Одна находится вблизи Боулдера в Колорадо (США)⁷, а другая, принадлежащая Корнелльскому университету, в обсерватории Аресибо в ПуэртоРико⁸.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЖИДАНИЯ

Остановимся кратко на описании экспериментальной установки в Боулдере, состоящей из передатчика, способного подавать мощность 2,0 *Мет* на большую антенну кольцеобразной формы, обеспечивающую



Рис. 2. а) Модель установленной в Платтевиле антенны, излучающей радиоволны с частотами от 5 до 10 *Мгц* (масштаб 1:100; диаметр кольца с девятью элементами равен 110 *м*; центральный элемент помогает подавить помехи от боковых лецестков диаграммы направленности); б) часть одного из элементов антенны, работа оцей в Платтевиле.

на выходе мощность около 10⁴ Mem/м². Антенна (рис. 2) была сконструирована для работы в области частот от 5 до 10 *Мгц*, что примерно соот-



Рис. 3. Зависимость от частоты типичных положений высот айогея в магнитной вертикальной плоскости север — юг (в месте расположения возмущающего радиопередатчика), достигаемых О- и Храдиоволнами.

Критические частоты для О- и Х-волн равны соответственно 7,0 и 7,55 Мгц.

ветствует обычному суточному изменению критической частоты ионосферы над Боулдером. Раствор антенного пучка в середине частотной полосы составляет примерно 16° (между точками половинной мощности). Эта антенна при соответствующем возбуждении может излучать электромагнитную энергию либо с правой, либо с левой круговой поляризацией (т. е. с электрическими векторами, вращающимися либо по часовой стрелке, либо против). Эти поляризации примерно совпадают соответственно с поляризациями в «обыкновенной» и «необыкновенной» модах распространения, характерных для магнитоактивной двоякопреломляющей среды, какой является ионосфера. Эти моды, обычно обозначаемые соответственно как О-мода и Х-мода, имеют различные скорости и распространяются в ионосфере по различным траекториям.

Пример различия при распространении этих двух типов волн приведен на рис. 3. Обе моды — обыкновенная и необыкновенная — с различными частотами вертикально падают на ионосферу. Через вертикаль и направление магнитного поля север — юг проводится плоскость, и в этой плоскости определяются траектории лучей на каждой частоте и для каждой моды. Эти лучи достигают наивысшей точки или «высоты апогея», на которой они отражаются. Рис. 3 представляет собой график местоположений таких высот апогея, рассчитанных для ночных условий в Боулдере. Лучи, отвечающие Х-волне, отклоняются к югу, поскольку они стремятся распространяться параллельно геомагнитному полю, а лучи, отвечающие О-волне, отклоняются к северу, так как они стремятся распространяться перпендикулярно полю. На заданной частоте О-волны достигают большей высоты, чем Х-волны. Вследствие этой магнитоактивной рефракции возмущенная область смещается к северу или к югу от вертикали в зависимости от поляризации падающего излучения.

Процесс поглощения, приводящий к нагреву *F*-слоя ионосферы с помощью мощных радиоволн, происходит следующим образом. Электроны на высоте, где плазменная частота близка к частоте радиоволн, начинают осциллировать под действием волны. Эти электроны просто переизлучали бы энергию на частоте радиоволн, если бы отдельные электроны не претерпевали соударений (примерно 10³ соударений в секунду, причем в основном с ионами). Претерпевающие соударения электроны забирают, таким образом, небольшое количество энергии от волны в форме случайного (т. е. теплового) движения. В результате этого поглощения электронная температура окружающей среды повышается. Тепло отводится от места его выделения вверх и вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля, в результате чего образуется нагретая область значительной протяженности.

Томсон ⁵ рассмотрел, как изменяется эффективность поглощения при изменении частоты радиоволн, и показал, что ионосфера вблизи критической частоты ведет себя как черное тело. Вблизи этой частоты падающая волна в основном поглощается, отражается же меньшая часть энергии. Когда частота падающей волны приближается к критической частоте снизу, поглощение волны вблизи уровня отражения все более возрастает. Это происходит вследствие того, что для типичного профиля концентрации электронов в F-слое (см. рис. 1) скорость волны ниже максимума слоя непрерывно уменьшается с высотой. Этот эффект примерно обратно пропорционален скорости изменения ионизации с высотой; он резко усиливается вблизи точки отражения волны, где ее скорость вообще стремится к нулю. Более медленные волны остаются в среде дольше, что ведет к более эффективному выделению тепла; следовательно, отражение волны в области с низким градиентом концентрации электронов способствует ее поглощению. Поглощение максимально на критической частоте, где этот градиент равен нулю. При частоте выше критической отражение снижается до нуля, а цоглощение падает с увеличением частоты, и коэффициент прохождения волн через ионосферу быстро растет почти до единицы.

Таким образом, при заданной частоте возмущающих радиоволны тепло выделяется в ионосфере, в основном в окрестности точки отражения, т. е. на высоте, где частота сравнима по величине с электронной плазменной частотой *). Выделяющееся тепло распространяется вдоль линий геомагнитного поля, что приводит к образованию областей сфероидальной формы с повышенной температурой электронов. Мельтц и Ле-Левье использовали в своих вычислениях параметры установки в Боулдере и рассчитали форму этой области для оптимальных условий, когда передатчик работает на частоте, слегка превышающей критическую частоту





Стационарной температуры электронов. Кривые показывают относительное возрастание температуры электронов в плоскости магнитного мерициана при нагреве с помощью О-волн (сплошные линии) и Х-волн (штриховые). Направление геоматнитного поля обозначено вектором В. Результаты основаны на теории * и вычислены для излучения мощностью 1 Мет при эффективном усилении антенны 17 дб с имриной пучка между точками половинной мощностью 0 Кото 20°. Оценка нагрева ионосферы О- и Х-волнами сделана для частот, превышающих критические на 0,3 и 1,4% соответственно. Ионосфера рассиматривалась как чопменовский слой с характерной высотой 40 км, с максимумом на 300 км и с максимальной плазменной частотой 7,0 Мги.

F-слоя. На рис. 4 приводится пример предсказанных ими контуров в вертикальной магнитной плоскости север — юг. В связи с различием траекторий, проходимых волнами двух мод колебаний (рис. 3), получаются два семейства контуров в зависимости от излучаемой антенной моды. Эти контуры, изображенные на рис. 4, и представляют собой предсказываемое теорией относительное возрастание электронной температуры после нескольких минут облучения на частотах, превышающих на 1% соответствующие критические частоты обыкновенной и необыкновенной волн.

Как видно из рис. 4, возрастание электронной температуры, происходящее в течение десятков секунд, должно затем приводить к амбиполярной диффузии нагретой плазмы (т. е. к совместной диффузии электронов и ионов) вдоль линий геомагнитного поля от места наиболее интенсивного нагрева.

В результате такой диффузии в окружающей плазме должна возникать область с пониженной концентрацией электронов ******). Контуры этой области должны быть аналогичны контурам, изображенным на рис. 4, с той разницей, что они будут отвечать уменьшению электронной концентрации. Скорость, с которой должна понижаться концентрация электронов, будет, однако, значительно меньше скорости возрастания температуры, что противоречит первоначальным предсказаниям Фарли ². Характерное время установления N должно быть порядка 20 мин, а не 20 сек, а это время уже сравнимо со временем, в течение которого

^{*)} Радиоволны эффективно поглощаются также в нижних слоях ионосферы. В ночных условиях это поглощение обычно невелико. (Прим. ред.)

^{**)} Возможно как понижение, так и повышение концентрации плазмы N при нагреве ионосферы. На высотах z ≥ 250 км концентрация понижается, а при z ≤ ≤ 200 км, напротив, повышается. Понижение N вызывается диффузией, а повышение — изменением баланса ионизации и рекомбинации в ионосфере²¹. (Прим. ред.)

происходят естественные изменения в окружающей ионосфере. (Это замедление возникает в результате того, что диффузия амбиполярна, т. е. что плазма должна оставаться всегда локально квазинейтральной; вследствие этого более медленные ионы, которые должны сопровождать электроны, замедляют движение последних в силу кулоновского притяжения. Ионы менее подвижны, чем электроны, из-за большей массы, а также вследствие их соударений с нейтральными частицами.)

Ожидаемые изменения температуры и концентрации электронов, движений ионосферной плазмы и изменение других ее свойств должны



Рис. 5. Схема экспериментальной установки для возмущения ионосферы. Источником возмущения служит расположенная в Платтевиле установка (40°,18 с. ш. и 104°,73 з. д.) с выходной мощностью антенны 10° *Мет* на кв. метр. Ионосферные зондирующие станции установлены в Эри и в Боулдерс; измерения для наклонных траекторий радиоволн производились менду Эри и Хардином. Наблюдения в оптической и инфракрасной областях на 6300 Å и 1,27 мям также производились в Эри. Типичная траектория луча, отвечающего X-волне, отмечена жирными стрелками.

поддаваться экспериментальным наблюдениям. Для этой цели пригодны различные методы. В настоящее время используются наблюдения изменения свечения, возникающего в результате возмущения ионосферы, отражения радиоволн и их некогерентного рассеяния. Изменения, возникающие в свечении на 6300 Å, связаны с рекомбинацией, и их можно интерпретировать в терминах изменения электронной температуры, поскольку скорость диссоциативной рекомбинации электронов и ионов O_2^+ (она является причиной обычного свечения при разряде в воздухе) обратно пропорциональна температуре ⁹.

Метод некогерентного рассеяния (применяемый в Аресибо) позволяет контролировать изменения концентрации и температуры электронов, а также движения плазмы. Измерения с помощью ионосферной зондирующей станции (радара с переменной несущей частотой) дают информацию об изменениях электронной концентрации. Предполагалось также, что измерения относительного коэффициента отражения радиоволн позволят определять изменение электронной температуры, поскольку коэффициент отражения должен увеличиваться с увеличением температуры электронов. Однако все эти методы измерений, как оказалось, привели к ряду неожиданных результатов, хотя ряд других наблюдений согласуется с предсказаниями теории.

На рис. 5 изображена схема экспериментальной установки в Боулдере. Мощный радиопередатчик расположен в Платтевиле, ионосферные станции — в Боулдере и Эри, фотометры для измерения свечения в Эри, а радиоприемники — в Хардине. Линии геомагнитного поля В составляют с осью магнитного диполя угол 68°, при этом склонение равно 13°. На рисунке изображена часть силовой трубки, окружающей линию В, а также луч, отвечающий Х-волне (обозначен жирными стрелками).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При возмущении ионосферы необыкновенной волной — Х-модой (10-минутные облучения с последующими 10-минутными перерывами) — Бионди и др. ⁹ наблюдали свечение, создаваемое возбужденными атомами кислорода (длина волны 6300 Å). Их наблюдения дали предсказываемое



Рис. 6. Модуляция интенсивности свечения ионосферы на 6300 Å. Возбуждение Х-радиоволнами при циклической работе передатчика: 10 мин включен, 10 мин выключен. Штриховой линией нанесена теоретическай кривая, вычисленная с подгонкой к экспериментальным данным с выбором соответствующих параметров ⁹.

1,253

теорией понижение интенсивности излучения (рис. 6). Полученные результаты свидетельствуют о повышении электронной температуры примерно на 35%. Однако при последующих измерениях, когда для возмущения ионосферы использовали О-волны ¹⁰, было получено, напротив, заметное усиление излучения на 6300 Å (рис. 7). Это усиление излучения означает, что происходит усиленное возбуждение атомов кислорода в результате их соударений с электронами. Для этого процесса требуется значительное количество электронов с энергиями, превышающими 2 эв. В частности, при тепловом (максвелловском) распределении электронных скоростей для получения наблюдаемого эффекта потребовалось бы повышение электронной температуры примерно до 2000 °К 11. С другой стороны, может иметь место нетепловое распределение электронов, когда быстрые электроны появляются в результате плазменной неустойчивости или же они образуются вследствие фотоэффекта под действием солнечного излучения в магнитосопряженной области Южной йолусферы Земли и приходят в Северную полусферу, двиѓаясь вдоль геомагнитного поля¹¹.

При возмущении ионосферы только X-волнами было зарегистрировано также усиление излучения возбужденных молекул кислорода на волне 1,27 мкм (инфракрасная область)¹². Механизм возбуждения этого излучения еще не ясен, как и в случае обычных полярных сияний, когда излучение на той же волне 1,27 мкм возбуждается естественным образом. Поэтому интерпретировать эти результаты пока невозможно. Это излучение измеряется фотометром, направленным на область на высоте 200 км, расположенную вдоль направления силовых линий геомагнитного поля, проходящих через нагретый объем, центр которого находится на высоте 300 км. Однако при непосредственном наблюдении горячего объема никакого излучения не замечено. Эти наблюдения пока еще не нашли объяснения.



Рис. 7. Модуляции интенсивности свечения в ионосфере, вызванного О-радиоволнами при циклической работе радиопередатчика: 6 мин включен, 6 мин выключен ¹⁰.

Для получения остальных экспериментальных результатов применялись различные радиометоды. Для исследования возникающих изменений электронной концентрации в Боулдере были использованы станции ионосферного зондирования. В этой методике получают «ионограммы», на которых время запаздывания, т. е. время между моментом излучения и моментом возвращения отраженного от ионосферы сигнала, изображается как функция радиочастоты. Таким образом, если бы радиоволна двигалась точно со скоростью света, ионограмма дала бы расстояние до точки отражения, т. е. до области, в которой плазменная частота становится равной радиочастоте. Поскольку концентрация ионосферной плазмы обычно зависит в основном только от высоты, отраженные сигналы должны приходить (при отсутствии геомагнитного поля) со строго вертикального направления, и наблюдаемые расстояния должны отвечать высоте.

В действительности ряд факторов усложняет эту идеализированную картину. Во-первых, в ионизованной среде, пронизанной геомагнитным полем, существуют две магнитоактивные моды, которые распространяются с различными скоростями, меньшими скорости света. Кроме того, эти моды не распространяются в ионосфере вертикально, а отклоняются к северу или к югу (см. рис. 3). Следовательно, ионограммы, по существу, дают график зависимости кажущегося, или «действующего», расстояния от частоты. Действующее расстояние, или, как обычно говорят, — действующая высота, определяется по времени запаздывания отраженного сигнала в предположении, что радиоволны распространяются со скоростью света.

Таким образом, действующая высота несколько больше истинного расстояния до точки отражения, причем истинное ее значение зависит от величины запаздывания волны при прохождении через ионосферу.



Рис. 8. Пример ионограммы.

а) Ионограмма, отражающая зависимость времени запаздывания максимума интенсивности отраженных сигналов от частоты (граентории на ионограмме размыты, чтобы проиллюстрировать явление F_{CHOP} (Fspread)); б) график зависимости интенсивности отраженного сигнала от времени его запаздывания для одной частоты. Для профиля ионосферного *F*слоя, такого, какой изображен на рис. 1, получаемая на опыте ионограмма напоминает ионограмму рис. 8, на котором видно, что О- и Х-моды разделяются.

В некоторых естественно возникающих условиях отраженные от *F*-слоя сигналы могут стать диффузными или размытыми (spread) по действующей Получающиеся ионовысоте. граммы называются тогда *F*spread-ионограммами для F_{спор}слоя. Разброс значений времени запаздывания отраженных сигналов связан с прохождением по траекториям, характеризуемым различными действующими высотами. Простейшая модель, с помощью которой можно понять ситуацию, такова. Пред-

ставим себе неоднородную «рябь», которая нарушает строгую однородность горизонтальных слоев ионосферы. Тогда вместо одного отраженного вертикального сигнала на данной частоте будет получено четное число дополнительных сигналов, отраженных от тех точек, где лучи ортогонально падают на эту «рябь». Это приведет к размытию ионограммы. Фактически при возникновении неоднородностей в ионосфере происходят более сложные явления, чем упомянутая простая модель, как, например, стремление естественных неоднородностей *F*-слоя вытягиваться вдоль геомагнитного поля.

Явление размывания *F*-слоя до сих пор не получило полного теоретического объяснения, но его обычно рассматривают как результат плазменной неустойчивости.

Один из неожиданных экспериментальных результатов, полученных при возмущениях ионосферы в Боулдере, — генерация искусственного слоя $F_{\rm спор}$ (см. ¹³ и ионограмму на рис. 9). Верхняя ионограмма была снята непосредственно перед включением радиопередатчика. В нижней части рисунка слева вблизи 100, 200 и 300 км на частотах ниже 2,5 *Мгц* видны сигналы, отраженные от *E*-слоя (области ионосферы, находящейся на высоте около 100 км; см. рис. 1), причем две верхние кривые образуются в результате двукратного и трехкратного последовательного отражения сигнала от *E*-слоя ионосферы и от земной поверхности. Сигналы с частотой больше 2,5 *Мгц*, отражение которых начинается с высоты около 250 км, возвращаются непосредственно из *F*-слоя, разветвляясь на ветви О- и Х-волн (критические частоты соответствуют вертикальным участкам кривых). Двукратное отражение этих сигналов видно на высотах, превышающих 500 км; оно сильно размыто, причем разброс высот связан с отражением сигнала от различных участков земной поверхности. На нижней ионограмме, снятой через 15 мин после начала возмущения ионосферы, сигналы, отраженные от *F*-слоя для О- и Х-волн, размыты, особенно вблизи критической частоты. Второе явное изменение ионограммы — появление нового отражения, возникающего в широкой полосе частот, несколько превышающей даже полосу первоначального сигнала



Рис. 9. Ионограммы, снятые в Эри (30 апреля 1970 г.), показывающие развитие запаздывающего широкополосного отражения за время возмущения ионосферы.

от *F*-слоя, и уходящего вверх на самых низких частотах. Эта дополнительная кривая отраженных сигналов выходит из первоначальной, постепенно возрастает и одновременно медленно размывается, начиная с области высоких частот. Из анализа этих изменений ионограмм во времени следует, что в ионосфере происходит существенное перераспределение электронов, а конкретно — возникает обедненная электронами область, которая постепенно смещается вверх вдоль линий геомагнитного поля.

Появление над Боулдером естественного слоя F_{cnop} почти всегда происходит в ночное время, обычно после полуночи. Однако в боулдерских экспериментах были зафиксированы искусственные F_{cnop} -неоднородности, возникающие в любое время при возбуждении ионосферы как О-, так и Х-волнами. На рис. 10 приведен пример образующихся днем слоев F_{cnop} . Верхняя и нижняя ионограммы сняты соответственно до и во время возмущения. В дневное время ионизация в *F*-слое часто разделяется на два подслоя, известные как слой *F*1 и слой *F*2. На верхней ионограмме рис. 10 U-образные кривые между 5 и 7 *Mгц* — сигналы, отраженные от *F*2-слоя. Две нижние кривые на верхней ионограмме этого же рисунка, которые при продлении вертикально вверх пересеклись бы с левой частью U-образных кривых, представляют собой сигналы, отраженные от *F*1-слоя. В обоих случаях критическая частота О- и Х-волн для *F*1- и *F*2-слоев определяется по наивысшим частотам, на которых кривые в силу значительного запаздывания сигнала приближаются к вертикали. Сигналы, отраженные вблизи высоты 100 км, приходят из Е-слоя, а остальные видимые кривые являются различными многократными отражениями



Рис. 10. Ионограммы, полученные в Эри (24 июля 1970 г.), показывающие развитие слоя F спор в дневное время при возмущении ионосферы мощными радиоволнами от наземного радиопередатчика.

от F-слоя. Разброс, возникающий при возмущении ионосферы радиоволнами, виден на нижней ионограмме на О- и Х-кривых для F2-слоя. В случае F1-слоя разброс главным образом возникает для О-волн. Отражение Х-сигналов от F1-слоя должно было бы происходить на истинных высотах около 150 км, и, по-видимому, искусственно вызванные в ионосфере неоднородности, образующие *F*спор-слой. возникают главным образом выше этого уровня. Для более высоких F1-слоев F_{сйор}-слой возникает как для Х-, так и для О-волн.

> Из верхней ионограммы рис. 10 была вычислена зависимость концентрации электронов от истинной высоты. График этих результатов приведен на рис. 11, причем появление резкого градиента на 200 км указывает на расслояние F-слоя на слои F1 и F2. Если предположить, что вызванные искусственно неоднородности, изображенные на нижней ионограмме рис. 10, располагаются истинных высотах отражения на

размытых сигналов, то можно заключить, что первые неоднородности образуются на высоте поглощения энергии, которая расположена вблизи точки отражения возмущающей радиоволны. В таком случае первое

поглощение энергии происходит на высоте 330 км — высоте максимальной ионизации, где возникает наибольшее число неоднороднотей. Затем следует дальнейшее развитие неоднородностей как в вышележащих, так и в нижележащих слоях. Полное развитие слоя F_{спор} происходит в течение примерно 90 сек (это время определяется из последовательности промежуточных ионограмм, не изображенных на рис. 10).

Создаваемый в дневное время слой F_{спор} после снятия возмущения исчезает быстрее, чем в ночное время. В области слоя F1 размытые сигналы исчезают через несколько







минут, а в области слоя F2 они могут сохраняться в течение 5-10 мин. Искусственный слой F_{спор} в ночное время существует десятки минут или больше, иногда сохраняется почти до восхода Солнца, особенно если он был создан после полуночи.

С целью определения изменения электронной температуры, связанной с возмущением ионосферы, мы контролировали коэффициент отраже-

ния радиоволн от ионосферы, посылая сигналы на частотах, близчастоте возбуждающих ких к радиоволн (при этом сигнал распространялся между Эри и Хардином почти вертикально; см. рис. 5). Предполагалось, что в силу набудет наблюэлектронов грева цаться небольшое увеличение коэффициента отражения. Для этого измерять относительную нужно интенсивность отраженных сигналов в течение времени, за которое ионосфера меняет свои параметры (другими словами, нужно измерять коэффициент отражения от невозмущенной и от нагретой ионосферы). Однако, вопреки теоретическим ожиданиям, в вечернее время в интервале между 5 и 10 сек после начала возбуждения О-волной наблюдалось сильное «аномальное» уменьшение коэффициента отражения О-волн (см. 14 и рис. 12). Понижение коэффициента отражения для О-волн наблюдалось также через более короткий промежуток времени, когда передатчик вклю-



Рис. 12. Временная зависимость коэффициента отражения О-волн, полученная на частоте зондирующей О-волны 6,342 Мгц при частоте О-волны возмущающего радиопередатчика 6,25 Мгц (З августа 1970 г.). Нанесенные точки — усредненные за 1 сек значения, а штриховая кривая получена путем сглаживания фединга. Точки, обозначенные «×», относятся к усреднению уровня сигнала за 5 сек с дентром во время, указанное на графике. Крайняя правая точка «×» отвечает усреднению за 45 сск.

чался и выключался с интервалами 100 мсек. Полученные в Эри ионограммы пают качественную зависимость изменений коэффициента отражения



Рис. 13. Ионограммы (30 июля 1970 г.), иллюстрирующие быстрое затухание отраженных сигналов в области частот примерно от 6,0 до 7,0 *Мгц* при возмущении ионосферы О-волнами на частоте 6,25 *Мгц*.

с частотой. Рис. 13 иллюстрирует затухание О-волн на ионограммах, снятых через несколько секунд после включения радиопередатчика

на всех частотах выше и слегка ниже возмущающей частоты, равной 6,25 *Мгц.* Запись нижней ионограммы была закончена через 6 сек после возмущения иоцосферы, а верхняя ионограмма снята непосредственно перед включением радиопередатчика. На нижней ионограмме



Рис. 14. Изменение электронной температуры на фиксированных высотах, указанных (в км) слева у каждой кривой (26 октября 1970 г.; от 0030 до 0110 AST).

Слева на рисунке указан масштабный интервал для температуры 100° К. Критическая частота *F*-слоя равна 5,7 *Мги*, а частота возмущающего радиопередатчика — 5,6 *Мги*. Точки на графике соответствуют 30-секундному усреднению; сплошные кривые — попытка интерполяции измерений. рис. 13 нижняя полоса отсутствует в области частот от 5 до 5,6 *Мец*; причина такого затухания неясна.

Некогерентное рассеяние ⁸ измеряли в Аресибо; ионосфера возмущалась с помощью радиопередатчика мощностью 100 квт, питающего 300-метровую антенну. Такая комбинация радиопередатчика с антенной дает на выходе антенны мощность на 3 дб меньше, чем система в Боулдере. Измерения в Аресибо показали, что температура ионосферы увеличи-



Рис. 15. Сравнение характерных времен нагрева и охлаждения, предсказываемых теорией ¹⁵ и полученных экспериментально (использованы данные, изображенные на рис. 14).

Рассчитанные изменения электронной температуры ΔT_e сопоставлены с изменениями температуры ионосферы ΔT_{e_0} на высоте 307 км (штриховая кривая); измерения произведены в Аресибо; сплошная кривая — теоретическая.

вается на 30% на высоте поглощения энергии и немного ниже нее, причем это имеет место как на О-, так и на Х-волнах. Временная зависимость нагрева ионосферы была исследована при использовании цикла работы передатчика: 2 мин включен, 2 мин выключен. На рис. 14 изображены изменения температуры (в градусах Кельвина) для восьми высот. Для высоты 307 км были получены характерные времена нагрева и охлаждения, равные 40 и 10 сек соответственно. Для более низких высот (за исключением высоты 298 км) наблюдалось более короткое время нагрева и более длительное время охлаждения. Для высот выше критической (313 км) наблюдались значительные флуктуации; поэтому можно предположить, что тепло переносится вверх от места поглощения энергии. Полученные результаты согласуются (рис. 15) с теоретическими вычислениями повышения электронной температуры над Аресибо ¹⁵, аналогичными проведенным в работе ⁴. В Аресибо под действием возмущающих радиоволн наблюдалось также усиление «плазменной линии» пекогерентного рассеяния ¹⁶. Плазменпая линия возникает в спектре мощности некогерептного рассеяния (т. е. на графике зависимости принимаемой рассеянной мощности от частоты), ее частота отличается от частоты передатчика на локальную плазменную частоту, ее усиление связано с возбуждением в ионосфере плазменных волн. Обычно фотоэлектроны вызывают усиление линии примерно на порядок величины по сравнению с тепловым уровнем мощности, рассеиваемой на этой частоте. Наибольшее усиление, искусственно полученпое в Аресибо, на четыре порядка величины больше теплового уровня. Этот важный эффект является, вероятно, результатом пеустойчивости плазмы. С другой стороны, наблюдавшееся в Боулдере усиление излучения на 6300 Å (см. выше) указывает, по-видимому, на то, что одновременно появляются и горячие (надтепловые) электроны с энергией порядка нескольких электрон-вольт. Полученные результаты собраны в таблице:

	О-возбуждение		Х-возбуждение	
	день	вечер	день	вечер
Спорадические отражения О-волн		-		
Спорадические отражения Х-волн	+-	+		
Затухание отраженных О-волн	0	+	0	
Затухание отраженных Х-воли	0		0	
Запаздывающие широкополосные отражения	0		0	+
Усиление свечения (6300 Å)	*	+	*	
Ослабление свечения (6300 Å)	\times		\times	
Усиление излучения 1,27 мкм	*	Н	\times	-+-
Повышение электронной температуры, на- блюдаемое при пекогерентном рассеянии		- - -	+	+
Усиление плазменной линии	+	Н	_	н
Микромодуляция отраженных О-волн	H	÷	н	н
Микромодуляция отраженных Х-волн	н	-	Н	Н
		[
(Знак «)» отвечает положительным результатам, знаком «—» обозначены пренебре- жимо малые эффекты, знак 沐 указывает на неприменимость, знак О — результаты юка не полностью надежные, но дают качественно малые или пренебрежимо малые эффекты, знак Н — даиные пока не получены.)				

В наших знаниях о некоторых наблюдаемых явлениях все еще существуют пробелы. Однако ниже мы сможем нарисовать определенную картину, основанную на результатах наблюдений, полученных примерно за год.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пекоторые из вышеупомянутых неожиданных результатов стимулировали дальнейшие теоретические исследования. По-видимому, первоначальные предсказания, основанные только лишь на повышении электронной температуры, не учитывают всех происходящих эффектов. Например, быстрое образование слоя F_{cnop} как в дневное, так и в ночное время вызвало удивление, поскольку предсказываемые изменения концентрации электронов должны были бы происходить более медленно. Образование слоя F_{cnop} , сильное затухание отраженных радиоволн и следующее

1/4 11 уФН, т. 109, вын. 2

за этим усиление свечения и плазменной линии некогерентного рассеяния — все указывает на то, что в плазме возникает неустойчивость, возбуждаемая на ее собственной плазменной частоте сильным переменным электрическим полем, падающим на ионосферу.

Такие рассуждения привели Перкинса и Ко¹⁷ к предположению, что все или некоторые из непредвиденных наблюдений свидетельствуют о наличии процесса, связанного с плазменными волнами и известного как параметрическая неустойчивость. Термин «параметрическая» указывает на периодическую модуляцию некоторых параметров колебательной системы, происходящую на такой частоте и с такой большой амплитудой, чтобы вызвать неустойчивость колебаний *). Возможно, появление неоднородностей F_{спор} можно объяснить и другой неустойчивостью, например, дрейфовой неустойчивостью ¹⁸, вызываемой аномально высоким градиецтом температуры ¹⁵ или самофокусировкой ¹⁹.

выводы

Эксперименты по изменению ионосферы дают возможность лучше понять аэрономию естественной ионосферы, а также осуществлять контроль природной плазмы, что открывает возможность дальнейшего прогресса в физике плазмы. Изменение ионосферы под действием мощных радиоволн аналогично изучению пагретой лазерами и микроволнами лабораторной плазмы 20. Появление «аномального» коэффициента отражения, апалогичное наблюдаемому ионосферному поглощению, уже отмечалось в плазме, модулированной микроволнами, а аномальный нагрев можно наблюдать в плазме, облученной лазером. Возникли контакты между физиками, работающими в этих разобщенных направлениях. разделенных широкой областью электромагнитного спектра. Может быть, изменение ионосферы явится также ценным методом в радиосвязи **).

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- a) T. E. van Zandt, R. W. Knecht, Space Physics, ed. by D. P. LeGalley and A. Rosen, New York London Sydney, Wiley. 1964 ch. 6; 6) В. Л. Гигз-бург, А. В. Гуревич, УФН 70, 201, 393 (1960).
 D. T. Farley, Jr., J. Geophys. Res. 68, 401 (1963).
 A. В. Гуревич, Геомагн. и аэроном. 7, 291 (1967).
 G. Melltz, R. E. LeLevier, J. Geophys. Rev. 75, 6406 (1970).

- H. C. Carlson, vacruoe coofineme.
 W. F. J. Evans, E. J. Llewellyn, J. C. Haslett, L. R. Megill, J. Geophys. Res. 75, 6425 (1970).

^{*)} Исследованию параметрической неустойчивости посвящено значительное количество работ; основные результаты их суммированы в обзоре Силина²². Параметрической неустойчивости в ионосфере посвящены в последнее время работы²³.

^{**)} Для распространения радиоволи существенны уже возмущения, вызываемые ими в нижних слоях поносферы (см., например, ¹⁶, ²⁴). Возбуждение неустойчивости в верхней ионосфере. как показано в работе ²⁴, приводит к усиленному поглощению и рассеянию радиоволн. Интересную роль могут играть и регулярные изменения концентрации плазмы в F-слое: они приводят к фокусировке и дефокусировке узких пучков 25, что может сказаться. в частности, на сверхдальнем распространении радиоволн ²⁶. Отметим, что с точки зрения персиектив использования в радиосвязи важным является также вопрос о возможности создания под действием мощных радноволн локальных областей высокой ионизации в нижней поносфере 27. (Прим. ред.)

- W. F. Utlaut, E. G. Violette, A. K. Paul, ibid., p. 6429.
 R. Cohen, J. D. Whitehead, ibid., p. 6439.
 N. M. Tomljanovich, G. Meltz, частное сообщение.
 H. C. Carlson, W. E. Gordon, R. L. Showen (будет онубликовано).
 F. W. Perkins, P. K. Kaw, J. Geophys. Res. 76, 282 (1971).
 D. M. Cunnold, ibid. 74, 5709 (1969).
 T. M. Georges, ibid. 75, 6436 (1970).
 J. M. Dawson, Phys. Fluids 7, 981 (1964); A. F. Haught, D. H. Polk. ibid.
 9, 2047 (1966); C. Fauguignon, F. Floux, ibid. 13, 386 (1970); J. Shearrer, частное сообщение: И. Р. Геккер, O. B. Спзухин, Письма ЖЭТФ 9, 408 (1969); P. Kaw, E. Valeo, J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. 25, 430 (1970); H. Driecer, D. B. Henderson, J. C. Ingraham, Los Alamos Sci. Lab. Rept. No. LA-DC-12569 (1971); H. P. Eubank, Princeton Univ. Plasma Phys. Lab. Rept. MATT-825, Jan. 1971. Lab. Rept. MATT-825, Jan. 1971.

ЛИТЕРАТУРА К ПРИМЕЧАНИЯМ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

- 24. И. М. Впленский. Изв. вузов (Радиофизика) 5, 221 (1962): 9, 649 (1966).
- 25. А. Г. Литвак, ibid., р. 629; 11, 1433 (1968); П. В. Блнох, А. А. Брюховецкий, Геомагн. и аэроном. 9, 545 (1969); А. В. Гуревич, ibid. 12, 24
- (1972).
 26. А. В. Гуревич, ibid. 11, 961 (1971), А. В. Гуревич, А. Б. Шварц-бург, Кр. сообш. физ. ФПАН СССР, № 9, 39 (1972).
- 27. А. В. Гуревич, Геомаги. и аэроном. 12. 618 (1972).