

УДК 551.510.536

ОБРАТНОЕ РАССЕЙЯНИЕ РАДИОВОЛН ИСКУССТВЕННЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ПЛАЗМЫ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

Н. В. Бахметьева, В. В. Беликович, В. Д. Вяхирев, В. Л. Фролов, Е. Е. Калинина

Научно-исследовательский радиопизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты экспериментов по исследованию механизма появления искусственных возмущений на высотах E -области при отражении мощной волны в F -слое ионосферы. Ионосфера в течение нескольких минут возмущалась мощной радиоволной обыкновенной поляризации, излучаемой передатчиками стенда «Сура» на частоте 4,3 или 4,7 МГц, а зондирование возмущённой области осуществлялось с помощью установки частичных отражений на частоте 2,95 МГц. На основе измерений высотно-временных характеристик амплитуды зондирующего сигнала зарегистрировано влияние на него искусственного возмущения на высотах ниже высоты отражения мощной волны на 40÷100 км. Обсуждаются возможные механизмы влияния возмущения в нижней ионосфере на пробные радиоволны.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования возмущённой области ионосферы, выполненные к настоящему времени, показали, что искусственные ионосферные неоднородности, возбуждаемые при нагреве F -области ионосферы мощными радиоволнами обыкновенной поляризации, обнаруживаются не только вблизи уровня отражения мощной радиоволны, где поглощается основная доля её энергии, но и далеко за пределами этой области, занимая высотный интервал от 120÷130 км до высот внешней ионосферы [1–9]. При этом по-прежнему наименее изученной остаётся область сравнительно низких высот (от верхней части E -области до начала F -слоя). Известно не так много экспериментов, в которых изучалось искусственное возмущение нижней ионосферы. Рассмотрим результаты некоторых из них. Так, в работе [1] приведены результаты одного из первых экспериментов по наблюдению искусственного F -рассеяния на нагревном стенде в Платтевилле (Колорадо, США) по его проявлению на ионограммах вертикального зондирования (ионозонд находился в 26 км к юго-западу от нагревного стенда). Получено, что объём, занятый искусственными неоднородностями, ответственными за F -рассеяние, простирался от высоты максимума F -слоя вниз до 150 км. В [2, 3] обсуждаются результаты экспериментов по исследованию возмущённой области методом ракурсного рассеяния и просвечивания её сигналами искусственных спутников Земли. Показано, что искусственные неоднородности электронной концентрации распространялись вверх от высоты отражения мощной волны более, чем на 100 км. В работах [4–7] приведены результаты экспериментов, в которых обратно рассеянные сигналы регистрировались с высот на 50÷120 км ниже, чем высота отражения мощной волны. В этих экспериментах возмущение ионосферы осуществлялось нагревным стендом «Сура», а приёмопередающий диагностический комплекс находился на расстоянии около 110 км к западу. При этом обратно рассеянный сигнал представлял собой частный случай сигнала ракурсного рассеяния пробных радиоволн на искусственных неоднородностях ионосферной плазмы с высот, где волновой вектор зондирующей радиоволны ортогонален геомагнитному полю. В [8] в экспериментах, выполненных с помощью бортовой аппаратуры спутника «Demeter» при воздействии на ионосферу радиоизлучением стенда «Сура», плазменные возмущения обнаруживались на высотах до 700 км. В работе [9] приведены результаты исследования характеристик сигналов обратного рассеяния в диапазоне частот

от 2 до 10 МГц с помощью двух радаров, один из которых был расположен на расстоянии 560 км к западу от стенда «Сура», а другой — на расстоянии 170 км к востоку от него. Авторы [9] считают, что аномально большие амплитуды рассеянных сигналов, позволившие зарегистрировать их на ионограммах наклонного зондирования, обусловлены фокусировкой пробных радиоволн вблизи уровня их отражения и (или) в окрестности каустики.

Показано, что в экспериментах по обратному рассеянию пробных радиоволн возмущённой областью ионосферы рассеянный сигнал могли обеспечивать неоднородности электронной концентрации с поперечными относительно геомагнитного поля масштабами от $15 \div 120$ м [9] до 500 м [4–7]. Оценки скорости распространения возмущения с высоты отражения мощной волны на высоте E -области в [6] показали, что эта скорость была сопоставима со скоростью прогрева ионосферы вдоль геомагнитного поля.

Как показано в [10], возникновение в возмущённой области ионосферы искусственных неоднородностей с поперечными масштабами сотни метров обусловлено тем, что вблизи точки отражения мощной радиоволны в F -слое развивается тепловая самофокусирующая неустойчивость, которая приводит к возникновению в плазме вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностей с характерным поперечным масштабом больше или порядка длины волны. В [4–7] образование неоднородностей во время работы нагревного стенда интерпретировалось как следствие развития тепловой самофокусирующей неустойчивости. Это подтверждено многочисленными экспериментами по исследованию особенностей распространения коротких радиоволн через искусственно возмущённую область ионосферы на трассах различной протяжённости от 200 км до 3000 км и более [11].

Целью экспериментов, результаты которых приводятся ниже, являлось изучение свойств и динамики искусственной ионосферной турбулентности, регистрируемой на сравнительно низких высотах по отношению к высоте отражения мощной волны при возмущении ею F -области ионосферы. Эксперименты проводились при совмещении нагревного стенда «Сура» и приёмопередающего диагностического комплекса в одном географическом пункте (п. Васильеурск, $56,1^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д.) на расстоянии 1 км друг от друга.

1. СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1.1. Режимы воздействия на ионосферу

Первый эксперимент проводился на стенде «Сура» 29–31 марта 2006 года с 8:00 до 10:00 московского времени (MSK). Воздействие на ионосферу осуществлялось радиоволнами обыкновенной поляризации на частоте 4,3 МГц в режиме (+10 мин, –10 мин), т. е. в течение 10 минут в непрерывном режиме излучались мощные радиоволны, в течение следующих 10 минут в работе стенда была пауза. Такой режим был выбран для того, чтобы за время воздействия на ионосферу обеспечить полное развитие искусственных ионосферных неоднородностей различных масштабов вплоть до километровых, а за время последующей паузы — их полную релаксацию, что позволило бы исключить влияние эффектов последствия на результаты измерений. Эффективная мощность излучения составляла около 80 МВт. Антенна нагревного стенда была наклонена на 12° к югу (в область магнитного зенита для мощной волны [12]) так, чтобы в резонансной области взаимодействия мощной волны с ионосферной плазмой волна распространялась вдоль геомагнитного поля, что приводит к усилению нагревных эффектов. Для контроля состояния ионосферы каждые 5 минут снимались ионограммы вертикального зондирования, по которым согласно методике [13] восстанавливался профиль электронной концентрации. Обработка ионограмм показала, что мощная волна отражалась на истинной высоте порядка $185 \div 210$ км.

Второй эксперимент был проведён 2 июля 2009 года с 12 до 15 часов московского време-

ни. Воздействие на ионосферу осуществлялось на той же частоте и поляризации, но в режиме (+3 мин, –7 мин). За минуту до окончания паузы проводился нагрев в течение 5 секунд. Эффективная мощность излучения составляла примерно 50 МВт (излучали два передатчика стенда). В отличие от предыдущего эксперимента антенна нагревного стенда была направлена в зенит. Экранировавший всю верхнюю ионосферу спорадический слой E с частотой экранирования f_{bE_s} выше 4,7 МГц и предельной частотой отражения $f_{0E_s} \sim 5 \div 7$ МГц наблюдался в течение всего периода измерений. Таким образом, мощная волна обыкновенной поляризации отражалась на высоте 105–115 км — высоте регистрации спорадического слоя E .

Третий эксперимент проводился 19 сентября 2009 года с 9:00 до 14:00 MSK. Воздействие на ионосферу осуществлялось радиоволнами обыкновенной поляризации вначале на частоте 4,3 МГц, затем по мере роста критической частоты F -области — на частоте 4,7 МГц с той же мощностью (50 МВт) в режиме (+3 мин, –7 мин), но в отличие от предыдущего эксперимента в каждую минуту паузы в течение последних 5 секунд дополнительно проводился нагрев ионосферы. Достоинством использованной схемы воздействия на ионосферу была возможность в одном эксперименте исследовать реакцию ионосферы как на относительно длинные (3 мин), так и на короткие (5 с) интервалы нагрева. С другой стороны, в этом режиме, очевидно, не во всех случаях могла происходить полная релаксация рассеянного сигнала во время паузы в работе стенда, поэтому предполагалось, что можно будет зафиксировать явления, связанные с последствием или накоплением эффектов нагрева, если они имеют место. Согласно восстановленным из ионограмм профилям электронной концентрации, мощная волна в этом эксперименте отражалась на высоте 170–180 км.

1.2. Параметры диагностического комплекса

Диагностика искусственных плазменных возмущений осуществлялась методом пробных волн на установке частичных отражений [14]. Диагностический передатчик излучал линейно поляризованный импульсный сигнал длительностью 30 мкс с частотой повторения 50 Гц и мощностью 50 кВт. Частота излучения пробных волн составляла 2,95 МГц в марте 2006 года и в сентябре 2009 года. В июле 2009 года в течение первых двух часов эксперимента диагностический передатчик сначала был настроен на частоту 2,95 МГц. Однако поскольку наблюдался интенсивный экранирующий спорадический слой E , полностью отражавший радиоволны данной частоты, позднее приёмопередающий комплекс был перенастроен на частоту 4,7 МГц. Приёмопередающая антенна установки представляет собой синфазную горизонтальную решётку зенитного излучения с размерами 126 × 126 м, подвешенную на 16 мачтах с высотой 12 метров. На каждой из двух линейных поляризаций имеется 12 излучателей. Каждый излучатель состоит из трёх диполей разной длины, соединённых параллельно. Благодаря этому антенна имеет три резонансные частоты: 2,95; 4,7 и 5,6 МГц. При работе на передачу антенна излучает радиоволну линейной поляризации. Принимаются две ортогональные линейные поляризации, из которых путём сложения со сдвигом фаз $\pm 90^\circ$ формируются сигналы двух круговых компонент. Таким образом, на приёме выделялись отражённые и рассеянные ионосферой сигналы обеих поляризаций, их квадратурные компоненты регистрировались в цифровом виде с шагом по высоте 1,4 км и частотой регистрации 10 Гц (первый эксперимент) и 12,5 Гц (второй и третий эксперименты), по которым определялись амплитуда и фаза рассеянного сигнала. Согласно восстановленному по данным вертикального зондирования профилю электронной концентрации пробные волны обыкновенной поляризации отражались на высоте порядка 110–140 км в 2006 году и на высотах 100–120 км в сентябре 2009 года (это высоты зеркального отражения пробных радиоволн)¹. В то же время,

¹ Ниже мы будем приводить как действующие высоты отражения зондирующего сигнала, связанные с временем группового запаздывания, которое фактически регистрировалось приёмной аппаратурой, так и истинные высоты

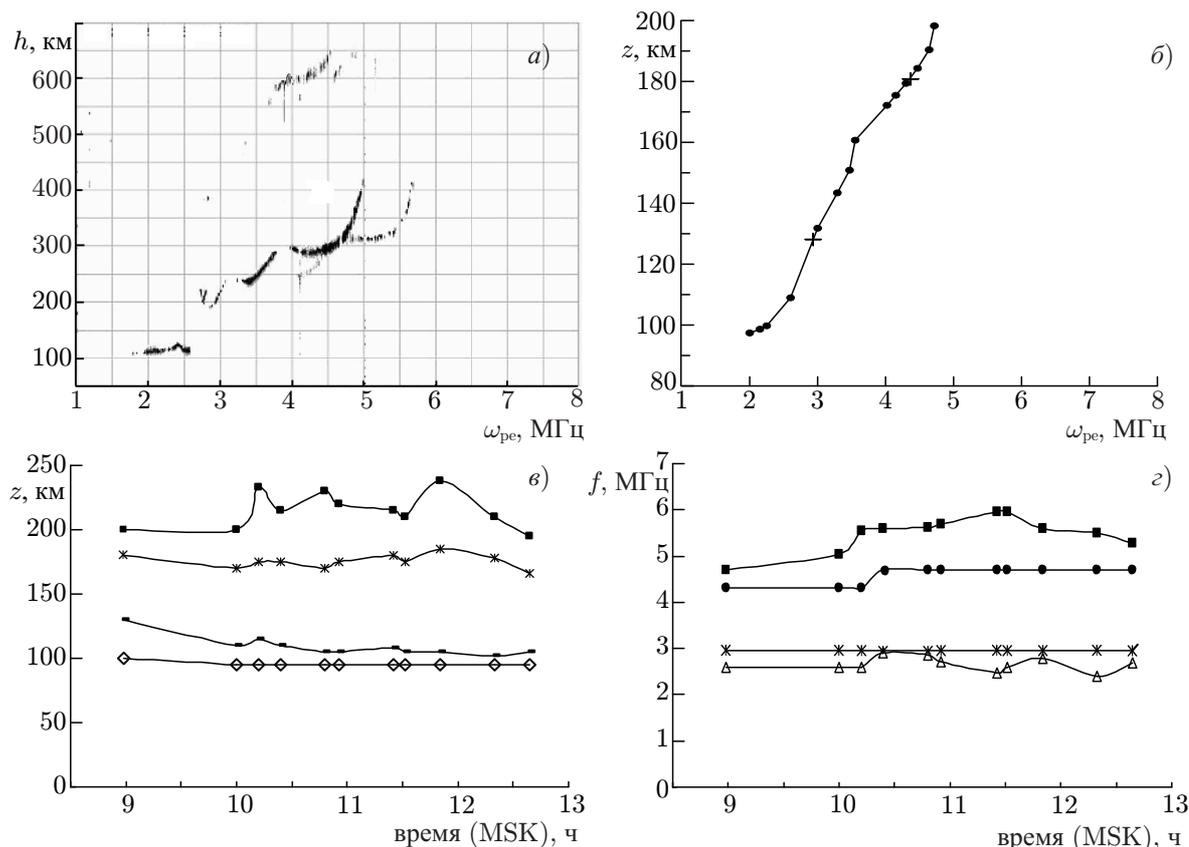


Рис. 1. Ионограмма вертикального зондирования для сеанса 09:29 MSK 19.09.2009 (а); восстановленный по ней профиль плазменной частоты электронов ω_{pe} (б); высоты отражения нагревной (звёздочки), обыкновенной (чёрточки) и необыкновенной (ромбы) компонент пробной радиоволны и высоты максимума слоя F_2 (квадраты) (в) и зависимость от времени критической частоты слоя F_2 (квадраты), нагревной частоты (точки), частоты пробной волны (звёздочки) и критической частоты E -области (треугольники) (г)

пробные волны необыкновенной поляризации в обоих экспериментах отражались вблизи и ниже высоты максимума E -области в интервале высот $95 \div 110$ км. Как упоминалось выше, в июле 2009 года наблюдался интенсивный спорадический слой E , который зеркально отражал как мощные радиоволны с частотой 4,3 МГц, так и пробные радиоволны с частотами 2,95 и 4,7 МГц.

Изложенное выше иллюстрирует рис. 1, на котором приведены: ионограмма вертикального зондирования для сеанса 09:29 19.09.2009 (а); восстановленный по ней профиль плазменной частоты электронов (б); высоты отражения нагревной, обыкновенной и необыкновенной компонент пробной радиоволны, высоты максимума слоя F_2 (в); зависимость от времени критической частоты слоя F_2 , нагревной частоты, частоты пробной волны и критической частоты E -области (г).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ДЕСЯТИМИНУТНЫХ СЕАНСАХ НАГРЕВА ИОНОСФЕРЫ (МАРТ 2006 ГОДА)

При воздействии на F -область ионосферы мощным радиоизлучением стенда «Сура» наблюдалось явление, похожее на искусственное F -рассеяние, которое заключается в появлении при отражения.

нагреве сигналов с высот, отличных от высоты зеркального отражения пробной радиоволны, развитии диффузности принимаемого сигнала за счёт его рассеяния на искусственных неоднородностях ионосферной плазмы [1]. В марте 2006 года сигнал при нагреве (назовём его дополнительным) принимался преимущественно с высот, превышавших высоты отражения зеркального сигнала, и мог занимать область действующих высот с протяжённостью до 150 км и более. Для примера на рис. 2 в координатах время—действующая высота представлена яркостная запись амплитуды зондирующего сигнала на частоте 2,95 МГц по результатам измерений 30 и 31 марта 2007 года с 08:00 до 10:00 MSK. Напомним, что регистрация обеих магнитоионных компонент зондиру-

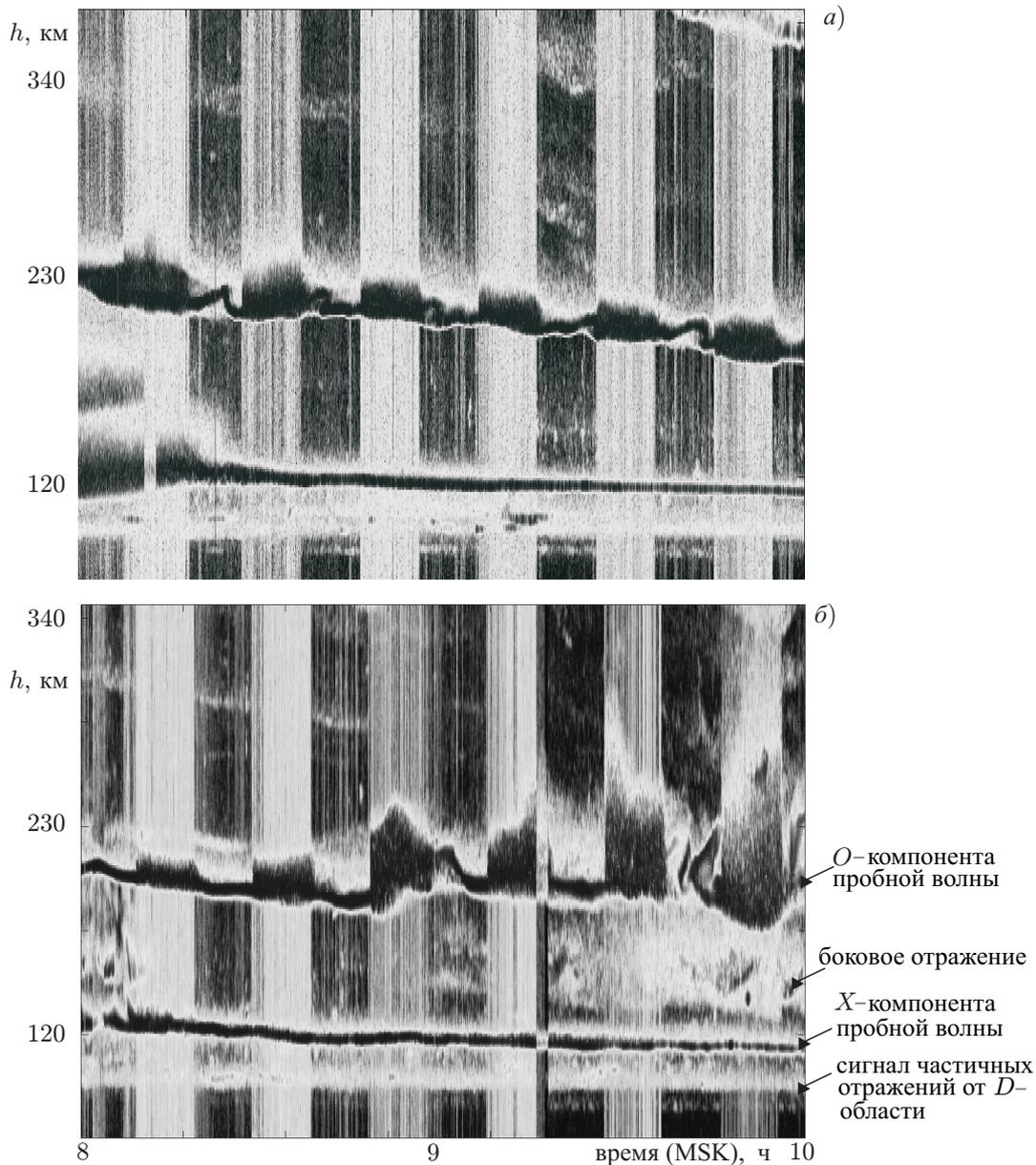


Рис. 2. Пример яркостной записи амплитуды пробной радиоволны в координатах время—действующая высота в измерениях 30 и 31 марта 2006 года с 07:59:36 до 10:01:47 MSK (рис. 2а и 2б соответственно). Светлые полосы соответствуют помехе, возникающей при работе стенда «Сура», т. е. периодам нагрева

щего сигнала проводилась одновременно. Вследствие недостаточно хорошей развязки компонент (порядка 14 дБ) наблюдалось «пролезание» сигнала из одного поляризационного канала в другой, поэтому в записи, соответствующей сигналу одной компоненты, обязательно присутствует и другая, ослабленная приблизительно на 14 дБ. Этот, казалось бы, явный недостаток приёмной аппаратуры имеет и положительную сторону: в случае, когда амплитуда сигнала от какой-либо области ионосферы выходит за пределы динамического диапазона приёмно-регистрирующей аппаратуры, этот сигнал можно наблюдать по его регистрации в другой поляризации и анализировать с учётом указанного ослабления. В результате на рис. 2, который соответствует регистрации необыкновенной компоненты сигнала, одновременно показаны как сигнал этой компоненты, так и сигнал обыкновенной поляризации. Стрелками на рис. 2 показаны зеркальный сигнал в паузе в работе стенда, сигналы, появлявшиеся при нагреве ионосферы, а также сигналы частичных отражений, обусловленные рассеянием радиоволн на естественных неоднородностях D -области, и, вероятно, боковые отражения волны обыкновенной поляризации, соответствующие действующим дальностям $120 \div 200$ км.

Из рис. 1 и 2 и следует, что пробная волна обыкновенной поляризации отражалась в верхней части E -области ионосферы и в нижней части слоя F_1 , в то время как необыкновенная компонента отражалась вблизи и ниже максимума E -области. В среднем, разность истинных высот зеркального отражения мощной и пробной радиоволн обыкновенной поляризации составляла 55 км. А в целом в данном эксперименте наименьшая истинная высота, с которой регистрировался дополнительный сигнал, была на $40 \div 100$ км ниже, чем высота отражения мощной волны. В наблюдениях 29 и 31 марта с течением времени область регистрации дополнительного сигнала (интервал действующих высот) расширялась преимущественно в сторону роста действующей высоты (см. рис. 2б), а 30 марта она менялась очень мало (см. рис. 2а). В то же время в целом в течение наблюдений 29–31 марта 2006 года действующая высота зеркального отражения пробных волн со временем уменьшалась на $15 \div 50$ км ($10 \div 30$ км по истинной высоте). Интервал действующих высот, с которых принимался сигнал при нагреве, увеличивался с течением времени наблюдения 29 и 31 марта и мало менялся 30 марта, что, вероятно, связано с более стабильной ионосферной обстановкой. Критическая частота F -области увеличивалась за время измерений с 4,5 до 5,5 МГц, что обусловлено переходом от утренних к дневным часам наблюдений.

На рис. 2 видно, что в периоды нагрева наблюдалось некоторое «зашумливание» яркостной записи (светлые вертикальные полосы на рис. 2), которое связано с влиянием излучения нагреваемых передатчиков на приёмный тракт диагностической аппаратуры, однако амплитуда «шума» была всегда значительно меньше амплитуд полезных сигналов.

На рис. 3 для сеанса нагрева 08:25–08:35 MSK 31.03.2006 приведён фрагмент записи амплитуды дополнительного сигнала на действующей высоте 225 км (истинная высота 145 км), тёмным отрезком на оси времени показано время воздействия на ионосферу. Дополнительный сигнал появлялся через несколько секунд после начала воздействия на ионосферу сначала вблизи высоты зеркального отражения пробной радиоволны с частотой $f = 2,95$ МГц и распространялся вверх.

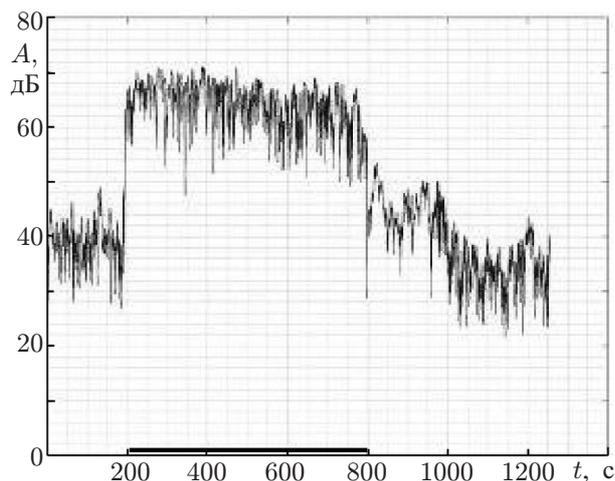


Рис. 3. Развитие и релаксация дополнительного сигнала на примере временной зависимости его амплитуды на истинной высоте 145 км в сеансе нагрева 08:25–08:35 MSK 31.03.2006

Амплитуда дополнительного сигнала, максимальная вблизи высоты зеркального отражения, уменьшалась с ростом высоты. Отметим, что амплитуда дополнительного сигнала во время нагрева в некоторых сеансах была сопоставима с амплитудой зеркального. Отметим также, что по измерениям 30 и 31 марта в большинстве сеансов нагрева амплитуда сигнала необыкновенной поляризации уменьшалась во время нагрева на приблизительно 5 дБ.

Релаксация, т. е. исчезновение дополнительного сигнала после окончания нагрева, продолжалась несколько десятков секунд (в среднем — полминуты), при этом постепенное пропадание сигнала начиналось с больших действующих высот. Иногда процесс релаксации был двухступенчатым, как показано на рис. 3, когда уменьшение амплитуды рассеянного сигнала после прекращения нагрева происходило с двумя характерными временами: сначала быстрое уменьшение с характерным временем $\tau_{\text{рел1}}$, затем более медленное с характерным временем $\tau_{\text{рел2}}$. Для сигнала, представленного на рис. 3, после первого этапа релаксации наблюдался даже некоторый рост амплитуды (см. также [15]).

2.1. Характерные времена развития и релаксации дополнительного сигнала

Для определения параметров искусственных ионосферных неоднородностей по характеристикам дополнительного сигнала были проанализированы временные вариации его амплитуды с шагом 7 км по действующей высоте (по истинной высоте это соответствует переменному шагу). Можно выделить следующие характерные времена вариаций амплитуды рассеянного сигнала:

1) время развития дополнительного сигнала до его стационарного уровня $\tau_{\text{стац}}$ (здесь под стационарным понимается средний уровень амплитуды сигнала, установившийся в сеансе нагрева ионосферы);

2) характерное время развития $\tau_{\text{разв}}$, определяемое по увеличению амплитуды сигнала в e раз на участке её экспоненциального роста;

3) время τ_0 появления дополнительного сигнала на высотах выше уровня зеркально отражённого пробного сигнала после начала нагрева ионосферы;

4) время τ_{00} запаздывания начала развития возмущения пробной волны после начала нагрева;

5) характерное время релаксации сигнала, определяемое по уменьшению его амплитуды в e раз: $\tau_{\text{рел1}}$ на первой стадии релаксации, когда происходит сравнительно быстрое уменьшение его амплитуды, и $\tau_{\text{рел2}}$ на второй стадии (более медленное уменьшение), если релаксация имела двухступенчатый характер.

В табл. 1 с четвёртого по девятый столбец представлены интервалы изменения (верхняя строка) и усреднённые за сеанс (нижняя строка) характерные времена дополнительного сигнала для

Таблица 1. Интервалы изменения и усреднённые значения характерных времён дополнительного сигнала для трёх сеансов нагрева 31.02.2006

Время (MSK), ч:мин	h , км	z , км	τ_0 , с	τ_{00} , с	$\tau_{\text{разв}}$, с	$\tau_{\text{стац}}$, с	$\tau_{\text{рел1}}$, с	$\tau_{\text{рел2}}$, с	Δz , км
08:29	210	135	5,0÷6,0	1,0÷3,5	1,5÷2,8	6,6÷8,0	23,0÷24,0	—	45÷50
	230	145	5,3	2,0	2,1	7,6	23,7	—	—
09:09	215	140	4,0÷9,0	0,3÷5,0	1,0÷2,2	6,0÷11,0	12,0÷18,0	29,0÷38,0	40÷45
	245	160	5,7	1,9	1,5	9,2	15,0	33,5	—
09:49	205	145	4,3÷9,8	0,3÷8,3	0,8÷1,2	9,9	11,0÷25,0	24,0	70÷100
	260	175	7,9	5,2	1,1	—	16,3	—	—

трёх сеансов нагрева с началом в 08:29, 09:09 и 09:49 MSK 31 марта 2006 года. Высота зеркального отражения пробной радиоволны в каждом сеансе нагрева менялась мало. По данным вертикального зондирования в этих сеансах истинные высоты отражения мощной волны с частотой $f = 4,7$ МГц составили порядка 185; 200 и 210 км. В свою очередь, пробная волна обыкновенной поляризации с частотой $f = 2,95$ МГц отражалась на высоте порядка 130; 160 и 110–140 км соответственно. В последнем случае её частота была практически равна критической частоте E -области, поэтому она отражалась в интервале высот областей $E-F_1$. Отметим, что возможное изменение профиля электронной концентрации при нагреве ионосферы при расчёте истинных высот отражения не учитывалось. Во втором и третьем столбцах табл. 1 даны наименьшая (верхняя строка) и наибольшая (нижняя строка) действующие h и истинные z высоты, с которых регистрировался дополнительный сигнал в период нагрева. В последнем столбце приведена разность истинных высот отражения мощной и пробной радиоволн Δz .

На основе анализа характерных времён изменения амплитуды сигнала при нагреве были сделаны следующие выводы:

1) при возмущении ионосферы дополнительные сигналы начинали регистрироваться на высотах, отличных от высоты отражения пробной волны, спустя время $\tau_0 \sim 5 \div 10$ с после включения нагревного стенда, а характерное время нарастания рассеянного сигнала на данной высоте — время развития процесса $\tau_{\text{разв}}$ — составило $1 \div 3$ с;

2) время запаздывания появления дополнительного сигнала на уровне отражения пробной волны после начала нагрева τ_{00} составило $0,3 \div 8,3$ с со средними значениями по сеансам $1,9 \div 5,2$ с;

3) характерные времена уменьшения сигнала за счёт релаксации искусственного возмущения после окончания нагрева составили в среднем $\tau_{\text{рел}1} = 24$ с и $\tau_{\text{рел}2} = 33,5$ с, если процесс релаксации рассеянного сигнала был двухступенчатым.

С ростом высоты время развития и время достижения стационарного значения амплитуды увеличивались, а время релаксации уменьшалось. Это обусловлено тем, что сигналы вначале появлялись на высоте, непосредственно примыкавшей к высоте отражения пробной волны, а затем распространялись на большие высоты. Соответственно, релаксация (пропадание) сигнала после окончания нагрева начиналась с больших высот.

2.2. Оценки характеристик неоднородностей и скорости распространения возмущения

Как упоминалось выше, при воздействии на ионосферу наблюдалось явление, подобное искусственному F -рассеянию, только в E -области. Возникающая при этом диффузность сигналов обычно обусловлена рассеянием на неоднородностях электронной концентрации. Полученные в эксперименте времена релаксации дополнительного сигнала при нагреве имеют значения, которые даёт процесс расплывания неоднородностей под влиянием амбиполярной диффузии с характерным продольным масштабом вдоль геомагнитного поля $l_{\parallel} \approx \sqrt{D_{\parallel} \tau_{\text{рел}}} \approx 350 \div 500$ м с учётом величины продольного коэффициента диффузии $D_{\parallel} \approx 8 \cdot 10^7$ см²/с на высоте 150 км [16].

Если полагать, судя по восстановленному профилю электронной концентрации, что сигналы, возникающие при воздействии на ионосферу, принимались с истинных высот 110–160 км, а мощная волна отражалась на высоте 185–210 км, то по регистрации дополнительного сигнала на высотах значительно ниже высоты отражения мощной волны можно оценить эффективную скорость перемещения плазменных возмущений V_{\parallel} , которые могут вызывать рассеяние пробных волн, вдоль силовых линий геомагнитного поля вниз от высоты отражения мощной волны. Учитывая, что для указанных в таблице сеансов измерений разность истинных высот мощной и пробной радиоволн составила по расчётам $\Delta z \approx 40 \div 100$ км, а время появления рассеянного

сигнала на уровне отражения пробной волны после начала нагрева составило $\tau_{00} \approx 0,3 \div 8,3$ с, получаем значение скорости $V_{\parallel} \approx (0,1 \div 1,5) \cdot 10^7$ см/с.² Эта величина намного превосходит тепловую скорость ионов на указанных высотах и близка к тепловой скорости электронов. Если полагать, что распространение возмущения с высот F -области на высоты нижней ионосферы происходит в результате прогрева ионосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля, то скорость, с которой распространяется возмущение, определяется как $V_T \approx 4\kappa_{\parallel}/(\Delta z N_{e0})$, где κ_{\parallel} — коэффициент продольной электронной теплопроводности, N_{e0} — невозмущённое значение электронной концентрации, Δz — разность высот отражения мощной и пробной радиоволн. Для значений входящих в формулу величин, характерных для условий эксперимента, получим величину $V_T \approx 2 \cdot 10^5$ см/с, что приблизительно на 1–2 порядка меньше V_{\parallel} . Если же предположить, что распространение неоднородностей вниз от высоты отражения мощной волны происходит за счёт амбиполярной диффузии, то указанная скорость должна быть равна диффузионной скорости $V_{ad} \approx D_{a\parallel}/\Delta z \approx (0,01 \div 0,08) \cdot 10^5$ см/с, что намного меньше значения эффективной скорости распространения возмущения в эксперименте, если полагать, что возмущение распространяется с высот F -области. Таким образом, оценки показывают, что распространение искусственных неоднородностей от высоты нагрева на более низкие высоты не могло происходить за счёт процесса амбиполярной диффузии. В то же время прогрев ионосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля происходил бы со скоростью меньшей, чем получена в эксперименте. Таким образом, нужно использовать иной механизм для объяснения появления возмущений на высотах нижней ионосферы, не связанный с его распространением вниз от высоты отражения мощной волны.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ТРЁХМИНУТНЫХ СЕАНСАХ НАГРЕВА ИОНОСФЕРЫ (ИЮЛЬ, СЕНТЯБРЬ 2009 ГОДА)

В экспериментах 2009 года была использована другая схема нагрева. Напомним, что работа проводилась 10-минутными циклами, в каждом из которых в течение 3 минут осуществлялось воздействие на ионосферу. После каждого трёхминутного нагрева следовала пауза в работе стенда длительностью 7 минут. Кроме того, последние 5 секунд каждой минуты паузы также проводилось воздействие на ионосферу. Как отмечалось выше, в июле 2009 года мощный спорадический слой E экранировал всю вышележащую ионосферу. Нагревная и пробная радиоволны, частоты которых отличались на 0,4 МГц, отражались спорадическим слоем практически на одной высоте. На яркостных записях амплитуды сигнала при нагреве были видны слабые дополнительные сигналы на высотах ниже высоты зеркального отражения от слоя E_s . Было проведено пять таких циклов наблюдений, в каждом из которых при нагреве эти сигналы были зарегистрированы.

В сентябре 2009 года было проведено 24 десятиминутных цикла нагрева. В первые часы измерений 19.09.2009 воздействие на ионосферу проводилось на частоте 4,3 МГц, по мере роста критических частот F -слоя с 4,7 МГц в 09:00 MSK до 5,7 МГц к 11:00 MSK частота воздействия на ионосферу была увеличена до 4,7 МГц.

Приведём основные результаты наблюдений во время трёхминутных сеансов нагрева 19.09.2009. В интервале действующих высот 170 ÷ 350 км (истинных 115 ÷ 180 км) во время нагрева зарегистрированы диффузные отражения пробных волн от E -области, критическая частота которой составляла 2,6 ÷ 2,9 МГц, и нижней части области F_1 . Зарегистрированы также сигналы частичных отражений от естественных неоднородностей электронной концентрации D -области (высоты

² Скорости переноса возмущений, возбуждаемых в F -слое ионосферы мощным радиоизлучением, превышавшие по величине 10^7 см/с, зарегистрированы в [22] по измерениям характеристик искусственного радиоизлучения ионосферы.

70÷90 км) и отражение от спорадического слоя E (100÷120 км), амплитуда которого была больше в необыкновенной компоненте. Во время нагрева во всех сеансах наряду с зеркальным отражением пробной волны наблюдался дополнительный сигнал, распространявшийся вниз и вверх от действующей высоты зеркального отражения пробной волны на 40÷60 и 150÷350 (и более) километров соответственно (в истинных высотах на 10÷30 и 50÷120 км). В отличие от предыдущего эксперимента, распространение возмущения вниз от действующей высоты зеркального отражения пробной волны было значительным, в то время как в мартовском эксперименте 2006 года дополнительный сигнал наблюдался, как правило, только выше зеркального.

На рис. 4а, в в координатах действующая высота—время приведены два фрагмента яркостной записи амплитуды пробной радиоволны обыкновенной поляризации с частотой 2,95 МГц длительностью 14 минут каждый. Тёмными отрезками на верхней оси показаны трёхминутные сеансы нагрева, а тонкими линиями в паузе — короткие сеансы нагрева длительностью 5 с. На рис. 4а хорошо видно быстрое появление дополнительного сигнала выше и более медленное ниже высоты зеркального отражения с последующей релаксацией во время четырёхминутной паузы.

На рис. 4б даны высотные разрезы временных вариаций амплитуды сигнала, начиная с действующей высоты 170,8 км с шагом 4,2 км до 196 км, что соответствует изменению истинной высоты в интервале 115÷130 км. Ступеньками на рис. 4б показаны интервалы нагрева ионосферы длительностью 3 минуты и 5 секунд. Видно, что амплитуда сигнала при нагреве довольно быстро достигает предельного уровня, что затрудняет определение времени развития сигнала после начала нагрева. В следующих сеансах нагрева усиление приёмника было уменьшено. Отметим, что для удобства представления данных зависимости амплитуды сигнала от времени построены со сдвигом по шкале амплитуд на 50 дБ. Амплитуда как зеркального, так и дополнительного сигнала временами выходила за пределы динамического диапазона приёмной аппаратуры. Минимальная действующая высота, с которой в эксперименте принимался дополнительный сигнал, составляла 150 км (истинная — 110 км). В трёх сеансах нагрева, подобно приведённому на рис. 4а, последние три минуты паузы в работе стенда по техническим причинам проводилось всего три (а не шесть, как следует из приведённой в разделе 1 схемы) коротких пятисекундных цикла нагрева, что позволило оценить время релаксации сигнала после прекращения трёхминутного нагрева. В других сеансах, когда короткие импульсы нагревный передатчик излучал каждую минуту паузы, за 55 с после окончания трёхминутного и до следующего короткого нагрева сигнал иногда не успевал полностью релаксировать. Рисунок 4в будет обсуждаться ниже.

3.1. Времена развития и релаксации рассеянного сигнала, характеристики неоднородностей

Отметим, что в целом значения времён развития и релаксации рассеянного сигнала такого же порядка, как и в эксперименте, проведённом в марте 2006 года. Для сеансов нагрева длительностью три минуты определены следующие временные характеристики сигнала:

1) время от начала нагрева, через которое рассеянные сигналы начинали регистрироваться на других (относительно высоты зеркального отражения) высотах τ_0 составило порядка 5÷20 с, а характерное время нарастания сигнала до выхода на стационар — время развития процесса $\tau_{\text{разв. стац}} \sim 10\div 170$ с на разных высотах;

2) время τ_{00} запаздывания появления рассеянного сигнала на высотах, отличных от высоты отражения пробной волны после начала нагрева, составило 2÷4 с; точнее его трудно определить, т. к. довольно часто начало работы стенда «Сура» сопровождалось ростом помехи; по этой же причине не удалось достаточно точно оценить время развития сигнала по уровню возрастания его амплитуды в e раз, можно только сказать, что оно не превышало 10 с;

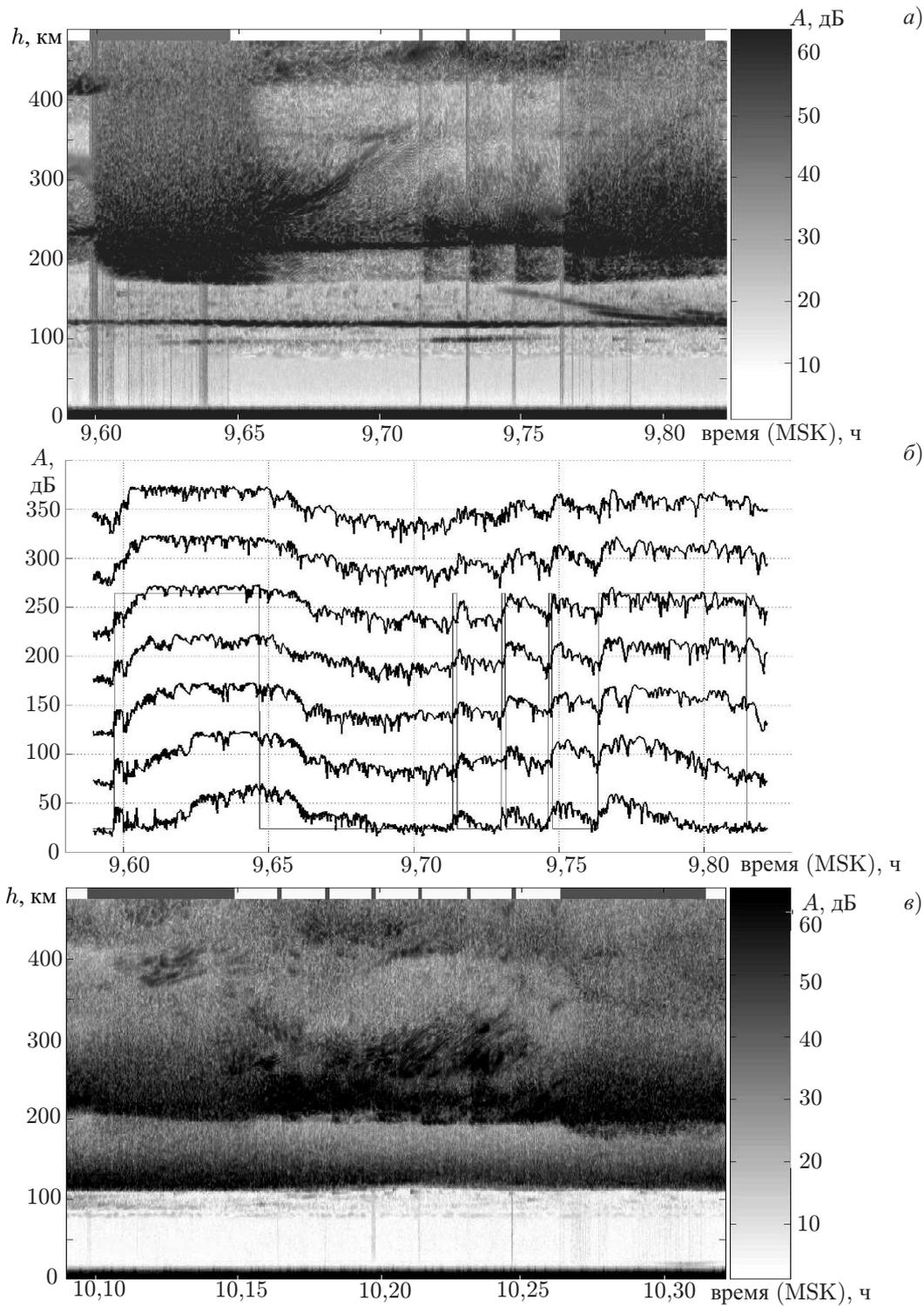


Рис. 4. Два фрагмента яркостной записи амплитуды пробной радиоволны для двух трёхминутных сеансов нагрева в каждом (а), (в) и высотные разрезы временных вариаций амплитуды сигнала для верхнего фрагмента (б). Нижняя кривая на рис. 4б соответствует действующей высоте 170,8 км, остальные кривые — возрастающим высотам с шагом 4,2 км. Тёмными отрезками на рис. 4а, в и ступеньками на рис. 4б показаны интервалы нагрева ионосферы с длительностями 3 минуты и 5 секунд

3) характерные времена релаксации рассеянного сигнала по спадаанию амплитуды сигнала в e раз составили в среднем $\tau_{\text{рел}} = 30 \div 60$ с.

Поскольку разность истинных высот отражения мощной и пробной радиоволн составила $50 \div 80$ км, для скорости распространения возмущения с высоты отражения мощной волны на высоты E -области получим значение $V_{\parallel} \approx (0,2 \div 0,4) \cdot 10^7$ см/с. Эта величина несколько меньше полученной в предыдущем эксперименте, но по-прежнему значительно превышает скорость амбиполярной диффузии.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПЯТИСЕКУНДНЫХ СЕАНСАХ НАГРЕВА ИОНОСФЕРЫ (ИЮЛЬ, СЕНТЯБРЬ 2009 ГОДА)

Остановимся на характерных особенностях сигнала при интервалах нагрева с длительностью 5 секунд. Обратимся вновь к рис. 4а. После начала нагрева возникал дополнительный сигнал, который занимал интервал действующих высот на 30 км ниже и 80 км выше уровня зеркального отражения пробной волны (в истинных высотах для данного сеанса — на 15 и 50 км соответственно). Обращают на себя внимание следующие моменты. Во-первых, длительность нагрева 5 секунд является достаточной для возникновения регистрируемых возмущений ионосферы на высотах E -области. Данный эффект в большей или меньшей степени наблюдался в каждом коротком сеансе нагрева (проведено всего 93 сеанса нагрева с длительностью 5 секунд).

Вторая особенность проиллюстрирована на рис. 4а, б, где видно, что в каждом последующем сеансе нагрева наблюдался более интенсивный дополнительный сигнал, который и более медленно релаксировал, т. е. ионосфера с каждым коротким нагревом как будто становилась более «подготовленной» к следующему сеансу воздействия. В приведённом примере в каждом последующем сеансе амплитуда рассеянного сигнала возрастала на $3 \div 5$ дБ. Таким образом, работа стенда «Сура» в режиме (+5 с, –55 с) приводила к «накоплению» эффектов нагрева. Следует отметить, однако, что данный эффект — рост амплитуды в каждом последующем сеансе нагрева — отчётливо проявлялся при стабильном зеркальном сигнале, т. е. когда высота отражения и амплитуда зеркального сигнала практически не менялись за время измерений. В условиях, когда высота зеркального отражения пробной волны и его амплитуда естественным образом изменяются во времени в зависимости от ионосферных условий, такая закономерность последовательных коротких нагревов может быть менее заметной.

Третьей важной особенностью коротких нагревов является продолжающийся рост амплитуды сигнала после прекращения воздействия на ионосферу, т. е. при длительности нагрева 5 секунд амплитуда сигнала достигает максимального значения через $5 \div 10$ секунд после его окончания. Подобный результат — рост амплитуды обратно рассеянного сигнала из возмущённой области ионосферы после окончания нагрева — был получен в [7] при разнесении пунктов размещения нагревного стенда и приёмно-регистрирующего комплекса на 110 км. Кроме того, подобный эффект был зарегистрирован по ракурсному рассеянию радиоволн [3, 17].

В течение следующей за интервалом нагрева паузы длительностью 55 секунд сигнал, как правило, успевал релаксировать за $20 \div 30$ с. В некоторых сеансах дополнительные сигналы регистрировались вплоть до следующего пятисекундного нагрева.

На рис. 4а на стадии релаксации сигнала, возникшего при нагреве на высотах ниже высоты зеркального отражения пробной волны, видно неоднородное, напоминающее стратифицированное, распределение сигнала по высоте. Отметим (см. другой фрагмент, рис. 4б), что около 10:00 MSK появилось диффузное протяжённое по высоте отражение ($115 \div 180$ км по действующей или $100 \div 125$ км по истинной) в обыкновенной компоненте, которое наблюдалось до 11:30 MSK,

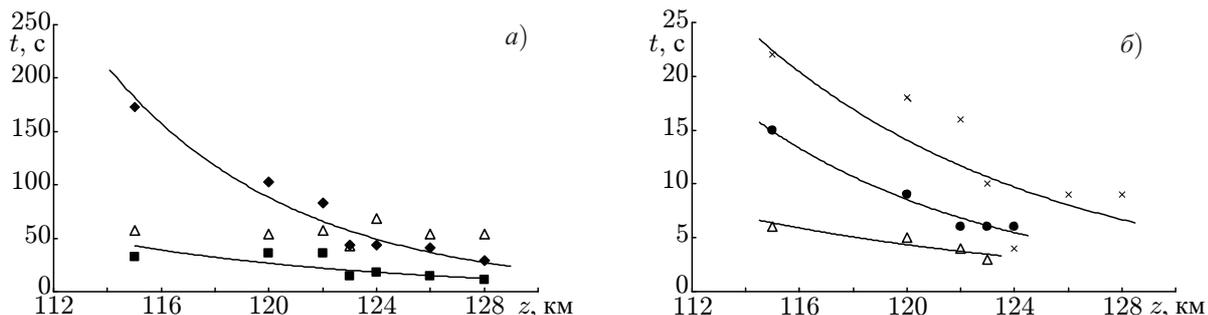


Рис. 5. Зависимости некоторых характерных времён для интервалов нагрева 3 минуты (а) и 5 секунд (б), построенные для дополнительных сигналов, принятых с высот ниже высоты зеркального отражения пробной волны с частотой 2,95 МГц. На рис. 5а время достижения амплитудой сигнала стационарного (или максимального) значения обозначено ромбами, время начала релаксации после окончания нагрева — квадратами, время релаксации после окончания нагрева — треугольниками. На рис. 5б приведены значения времён релаксации для первого (треугольнички), второго (точки) и третьего (крестики) коротких последовательных интервалов нагрева

а также с 11:20 до 12:10 и с 12:40 до 13:30 MSK, т. е. большую часть времени наблюдения. По сравнению с сеансами, в которых такой диффузности не наблюдалось, дополнительный сигнал был слабее. Это может быть связано с развитием диффузного спорадического слоя E , зарегистрированного на ионограммах, и небольшим естественным повышением критической частоты E -области, так что обыкновенная компонента пробной волны одновременно отражалась как в E -области, так и в области F_1 . Кроме того, получено, что между верхней границей высоты приёма диффузного сигнала и нижней границей высоты приёма дополнительного сигнала при нагреве есть интервал, в котором никаких сигналов практически зарегистрировано не было или они занимали крайне малый интервал высот. Вероятно, в этом случае на профиле электронной концентрации существовала межслоевая впадина — E – F -долина. В течение 20 минут с 12:40 до 13:00 MSK, когда наблюдался наиболее интенсивный диффузный сигнал от E -области, причём верхняя граница этого сигнала плавно переходила в нижнюю высоту сигнала от слоя F_1 , амплитуда дополнительного сигнала уменьшилась на 5–10 дБ. По нашему мнению, этот факт свидетельствует о некотором «сглаживании» межслоевой впадины, т. е. уменьшении её глубины.

На рис. 5 приведены зависимости некоторых характерных времён для трёхминутного (а) и пятисекундного (б) сеансов нагрева. Заметим, что графики построены для временных характеристик сигналов, появившихся на высотах ниже высоты зеркального отражения пробной волны с частотой 2,95 МГц. Как отмечалось выше, вначале регистрировались сигналы с высот, близких к высоте зеркального отражения, которые за время порядка 30 с заняли область действующих высот ниже на 40 км и выше более, чем на 200 км. Это означает, что возмущение с высоты зеркального отражения пробной волны распространилось на нижние высоты со скоростью порядка $1,3 \cdot 10^5$ см/с, а на верхние — со скоростью $(1 \div 6) \cdot 10^5$ см/с. Все характерные времена увеличиваются с уменьшением разности высот дополнительного сигнала и высоты зеркального отражения пробной волны и, напротив, растут с её увеличением. Эта же тенденция сохраняется и для коротких сеансов нагрева. Как отмечалось выше, после прекращения нагрева происходила релаксация дополнительного сигнала, но в большинстве сеансов ионосфера оставалась турбулизованной до следующего нагрева. Об этом свидетельствует регистрация сигнала во время паузы.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Дадим качественную интерпретацию результатов экспериментов.

Вначале аналогично [6] мы предполагали, что возмущения, создаваемые в F -области мощным радиоизлучением стенда «Сура», распространялись на высоты E -области в результате прогрева ионосферы. Оценки, сделанные по измеренным значениям времени появления возмущения — дополнительного сигнала на частоте пробной волны — на высотах, отличных от высоты её зеркального отражения, показали, что на высоты E -области возмущение с уровня отражения мощной волны должно было распространяться со скоростью, близкой к тепловой скорости электронов или за счёт прогрева ионосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля. Но в [7] при многочастотном зондировании возмущённой области рассеянный сигнал вначале появлялся вблизи высоты отражения мощной волны в F -слое, а затем область приёма сигнала распространялась как вверх, так и вниз от данной высоты. В экспериментах, результаты которых приводятся в статье, дополнительный сигнал при нагреве появлялся на высоте отражения не мощной, а пробной волны обыкновенной поляризации в E -области, а затем область приёма сигнала расширялась. В экспериментах 2006 года она расширялась только вверх от высоты зеркального отражения пробной волны, а в экспериментах 2009 года — и вверх, и вниз. Об этом свидетельствует рост времени запаздывания появления сигнала на данной высоте в зависимости от её удаления от высоты зеркального отражения пробной волны (на этой высоте амплитуда пробной волны максимальна). Кроме того, если в [4] амплитуда рассеянного сигнала вблизи высоты зеркального отражения составляла 20–30 % от амплитуды зеркального сигнала, а в [7] — до 50 %, то в обсуждаемых экспериментах уровни этих сигналов в некоторых сеансах были сопоставимы.

Таким образом, можно полагать, что на пробные волны с частотой 2,95 МГц оказывало влияние возмущение E -слоя ионосферы и нижней части слоя F_1 . Обсудим механизмы возмущения этой области высот.

Первый из них связан непосредственно с нагревом E -области. В случае, когда частота нагрева превышает критическую частоту E -области f_{0E} , нагревающая волна с частотой 4,7 МГц отражается на высотах F -слоя (высота отражения мощной волны примерно 160–180 км при высоте максимума слоя порядка 200–240 км), при этом происходит нагрев E -области «напросвет». В этом случае, в отличие от ситуации, когда нагревающая волна отражается от E -области и нагрев является локальным, а область возмущения не превышает несколько сотен метров [16], нагрев «напросвет» приводит к возмущению плазмы во всём слое E , т. е. вертикальный масштаб возмущённой зоны (изменения температуры и концентрации электронов) может составлять 20–40 км [16, 18, 19]. При этом с ростом температуры электронов электронная концентрация в возмущённой E -области также растёт вследствие изменения ионизационно-рекомбинационного баланса при нагреве [16]. В результате увеличивается коэффициент отражения пробной волны и её амплитуда при нагреве растёт. Время развития возмущения электронной концентрации составляет $\tau_N \approx 1/(\alpha N) \approx 10\text{--}30$ с, где α — эффективный коэффициент рекомбинации, N — электронная концентрация.

Тот факт, что сигналы при нагреве появлялись с высот, с которых в паузе отсутствовали, может означать рост концентрации электронов N на этих высотах. При трёхминутных интервалах нагрева время появления дополнительного сигнала сопоставимо с величиной τ_N (сентябрь 2009 года). Несколько неожиданным оказался тот факт, что, как сообщалось выше, амплитуда дополнительного сигнала в ряде случаев, особенно в сентябре 2009 года, была порядка амплитуды зеркального сигнала³. Кроме того, уменьшение при нагреве амплитуды сигнала необыкновенной поляризации, о котором сообщалось выше, может быть вызвано ростом поглощения этой

³ В работе [9] сообщалось об аномально больших значениях амплитуды рассеянного сигнала, которые авторы связали с фокусировками на каустике.

компоненты, также связанного с ростом электронной концентрации.

Отметим, что нагрев E -области на частоте выше ее критической частоты впервые был зарегистрирован на нагревном стенде в Зимёнках по изменению высоты отражения пробной радиоволны, при этом возмущение концентрации электронов составило $1 \div 5$ % [20]. В дальнейшем методом многочастотного доплеровского зондирования было зарегистрировано положительное возмущение концентрации E -области при нагреве её радиоизлучением стенда «Сура» с эффективной мощностью 100 МВт «напросвет», при этом, по оценкам, увеличение электронной концентрации могло достигать 20 % [21].

Другим механизмом возмущения E -области является влияние нагрева на её неоднородную структуру. Этот вопрос был подробно рассмотрен в работах [18, 19]. Предполагалось, что одним из механизмов образования неоднородностей E -области является турбулентное перемешивание плазмы. Важную роль в этом процессе играет перераспределение в геомагнитном поле заряженных частиц в пределах турбулентного вихря. В этом случае нагрев электронного газа области E будет влиять на её неоднородную структуру через зависимость от температуры электронов электронной концентрации N , коэффициента амбиполярной диффузии $D_a = \kappa (T_e + T_0) / (M_i \nu_{im})$, где M_i и ν_{im} — масса ионов и частота соударений ионов с нейтральными частицами, T_0 и T_e — невозмущённое и возмущённое значения температуры электронов соответственно, κ — постоянная Больцмана, и эффективного коэффициента рекомбинации $\alpha = \alpha_0 (T_e/T_0)^{-1/2}$, что справедливо при $T_e < 1000$ К [16]. В [18, 19] получено выражение для изменения электронной концентрации в неоднородностях, из которого следует, что характер возмущения концентрации зависит от того, какой процесс преобладает — рекомбинация или диффузия. В первом случае электронная концентрация в неоднородностях увеличивается, как и концентрация в фоновой E -области вследствие уменьшения при нагреве эффективного коэффициента рекомбинации. Во втором случае (преобладание диффузии) нагрев электронного газа приводит к уменьшению электронной концентрации в неоднородностях. Такое рассмотрение показывает, что в E -области существует некоторый критический масштаб неоднородностей $l_{кр}$, и если масштабы неоднородностей $l > l_{кр}$, то при нагреве концентрация N в неоднородностях возрастает. В противном случае, когда $l < l_{кр}$, электронная концентрация в неоднородностях убывает. В [19] для типичных условий дневной E -области получено значение $l_{кр} \approx 200$ м. Принимая эту концепцию и исходя из оценок размеров неоднородностей, полученных по временам релаксации дополнительных сигналов, получим, что неоднородности электронной концентрации E -области должны были при нагреве усиливаться, что, в свою очередь, должно было приводить к росту рассеянного ими сигнала. Времена развития дополнительного сигнала соответствуют τ_N . В случае, если определяющую роль играет рассеяние на естественных неоднородностях E -области, усиливающихся при нагреве, можно объяснить и неполную релаксацию при коротких нагревах. В этом случае «подготовленной» ионосферы, амплитуда сигнала при каждом последующем коротком нагреве могла быть выше, чем в предыдущем.

Ещё один механизм, который мог вызывать наблюдавшееся в экспериментах явление, — это неустойчивый характер возмущения температуры и концентрации в искусственных неоднородностях, возникающих при нагреве ионосферы. Проведённое в [16] рассмотрение общего случая сильно вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностей показывает, что при определённых параметрах неоднородностей и дрейфе заряженных частиц в магнитном поле, вызванном, например, движением нейтрального газа, внешним электрическим полем, неоднородностью магнитного поля и др., в неоднородной плазме развиваются плазменные неустойчивости и неоднородности могут нарастать.

В пользу неустойчивости как механизма, обеспечивающего некоторое возбуждённое состояние плазмы и после окончания нагрева, свидетельствует, на наш взгляд, эффект, связанный

с явлениями последействия, особенно ярко выраженный при коротких нагревах⁴.

С помощью неустойчивостей можно объяснить образование неоднородностей определённых масштабов, оценить степень их вытянутости, времена развития и релаксации при внешнем источнике нагрева плазмы E -области [10, 16, 23–25]. Этот вопрос наряду с результатами нового эксперимента и моделированием наблюдаемых нагревных эффектов будет более подробно рассмотрен в следующей работе.

6. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По результатам экспериментов, направленных на изучение механизма возникновения искусственного возмущения на высотах нижней ионосферы, можно сделать следующие основные выводы.

1) Зондирование ионосферы пробными радиоволнами, отражавшимися на высотах нижней ионосферы, на частоте, значительно ниже частоты мощной волны, показало, что на пробные волны с частотой 2,95 МГц наиболее вероятно оказывало влияние возмущение E -слоя ионосферы и нижней части слоя F_1 . Появление во время нагрева дополнительных сигналов могло обеспечиваться ростом электронной концентрации в нижней ионосфере при нагреве и усилением её неоднородной структуры.

2) Получено, что короткие сеансы нагрева длительностью несколько секунд вызывают возмущение ионосферной плазмы на низких высотах; для них наблюдался эффект последействия, когда максимального значения амплитуда сигнала достигала через 5–10 с после окончания нагрева, и эффект накопления, когда наблюдался рост амплитуды сигнала в каждом последующем сеансе нагрева. Вероятно, такие особенности могли обеспечиваться развитием неустойчивостей плазмы при нагреве.

3) Значения времён релаксации амплитуды сигнала после окончания нагрева соответствуют исчезновению возмущений за счёт амбиполярной диффузии, причём определённый по ним продольный масштаб искусственных неоднородностей мог составлять 350–500 м.

Отметим, что описанные в статье нагревные эффекты — появление дополнительного сигнала во время нагрева, эффекты последействия и накопления — в значительной степени зависят от ионосферных условий во время проведения эксперимента.

Не объяснены в достаточной степени отличия результатов, полученных в 2006 и 2010 годах, касающиеся разных высот приёма дополнительного сигнала. Остались не вполне понятными сравнительно высокие значения амплитуд этих сигналов. Результаты экспериментов показывают, что необходимы дополнительные теоретические исследования механизмов генерации искусственных ионосферных неоднородностей на высотах E -области. В экспериментальном плане на многие вопросы позволило бы ответить многочастотное зондирование возмущённой области.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08–02–97036, 08–02–00171 и 09–05–00450).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allen E. M., Thome G. D., Rao R. B. // Radio Sci. 1974. V. 9, No 11. P. 905.

⁴ Отметим, что недавние эксперименты, проведённые в марте 2010 года с несколько изменённой схемой нагрева, показали, что описанные в статье явления — появление дополнительного сигнала во время нагрева, эффекты последействия и накопления — стабильно наблюдаются, однако их характеристики в значительной степени зависят от ионосферных условий во время проведения эксперимента.

2. Ерухимов Л. М., Митякова Э. Е., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 12. С. 1814.
3. Ерухимов Л. М., Метелёв С. Н., Мясников Е. Н., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 1. С. 208.
4. Беликович В. В., Зюзин В. А., Толмачева А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 5. С. 579.
5. Бахметьева Н. В., Игнатъев Ю. А., Шавин П. Б. // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 33, № 12. С. 1424.
6. Бахметьева Н. В., Игнатъев Ю. А., Дмитриев С. А., Шавин П. Б. // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32, № 3. С. 180.
7. Бахметьева Н. В., Гончаров Н. П., Игнатъев Ю. А. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 5. С. 799.
8. Рапопорт В. О., Фролов В. Л., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 709.
9. Акчурин А. Д., Ким В. Ю., Панченко В. А. и др. // XXII Всерос. конф. по распространению радиоволн, 22–26 сентября 2008, г. Ростов-на-Дону—п. Лоо: Тр. конф. Т. 2. С. 175.
10. Васьков В. В., Гуревич А. В. // Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький: ИПФ РАН, 1979. С. 81.
11. Игнатъев Ю. А. Воздействие нагрева ионосферной плазмы мощным вертикальным радиоизлучением на характеристики декаметровых сигналов наклонного зондирования: Дис. . . . докт. физ.-мат. наук. Горький, 1987. 335 с.
12. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
13. Гуляева Т. Л. // Методы расчёта и исследования $N(h)$ -профилей ионосферы. М.: ИЗМИРАН, 1973. С. 76.
14. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Вяхирев В. Д. // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т. 35, № 1. С. 107.
15. Бахметьева Н. В., Бубукина В. Н., Игнатъев Ю. А., Шавин П. Б. // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36, № 1. С. 77.
16. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.
17. Насыров А. М. Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. Изд-во Казанского университета, 1991. 149 с.
18. Гершман Б. Н., Игнатъев Ю. А. // Ионосферные исследования. 1997. № 50. С. 7.
19. Игнатъев Ю. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14, № 4. С. 554.
20. Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г., Зюзин В. А., Игнатъев Ю. А. // Геомагнетизм и аэрономия. 1980. Т. 20, № 5. С. 955.
21. Бойко Г. Н., Васьков В. В., Голян С. Ф. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39, № 1. С. 533.
22. Фролов В. Л., Сергеев Е. Н., Штуббе П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 2. С. 121.
23. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974. 256 с.
24. Kagan L. M., Kelley M. C. // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 4141.
25. Гуревич А. В., Караштин А. Н. // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т. 24, № 6. С. 885.

Поступила в редакцию 20 мая 2010 г.; принята в печать 30 июня 2010 г.

**BACKSCATTERING OF RADIO WAVES BY ARTIFICIAL IRREGULARITIES
OF PLASMA IN THE LOWER IONOSPHERE**

N. V. Bakhmet'yeva, V. V. Belikovich, V. D. Vyakhirev, V. L. Frolov, and E. E. Kalinina

We present the results of the experiments on studying the mechanism of the appearance of artificial disturbances at the altitudes of the *E* region when a high-power wave is reflected in the ionospheric *F* layer. The ionosphere was disturbed for a few minutes by a high-power o-mode radio wave radiated by the transmitters of the “Sura” facility at frequencies 4.3 or 4.7 MHz. The disturbed region was sounded using a partial-reflection setup at a frequency of 2.95 MHz. The influence of the artificial disturbance on the probing signal at altitudes lower than the height of reflection of a high-power wave at 40–100 km was registered on the basis of measurements of the altitude–time characteristics of the probing-signal amplitude. Possible mechanisms of the influence of the disturbance in the lower ionosphere on the probing radio waves are discussed.