

УДК 550.388:533.951+573.868

ДИАГНОСТИКА ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРОТКИХ РАДИОТРАСС ЗОНДИРОВАНИЯ

И. А. Болотин¹, В. Л. Фролов¹, А. Д. Акчурина², Е. Ю. Зыков², К. М. Юсупов²

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород;

² Казанский Приволжский федеральный университет, г. Казань, Россия

В работе рассмотрены возможности диагностики искусственных ионосферных неоднородностей с поперечным размером $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м, возбуждаемых в ионосфере Земли мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура», с использованием техники вертикального зондирования ионосферы ионозондом, расположенным близко к нагревному стенду. Приведены некоторые результаты выполненных исследований, демонстрирующие особенности такой диагностики.

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие мощным коротковолновым радиоизлучением на ионосферу Земли вызывает комплекс явлений, приводящих к генерации искусственной ионосферной турбулентности. Одной из наиболее важных компонент турбулентности являются искусственные ионосферные неоднородности с поперечным (по отношению к геомагнитному полю) размером от долей метра до десятка и более километров. Изучение их спектральных и динамических характеристик даёт возможность исследовать свойства вызываемых мощной радиоволной неустойчивостей, изучать особенности динамических процессов в ионосфере, а также определять возможное влияние искусственных неоднородностей на распространение радиоволн различных диапазонов.

Спектральные характеристики искусственных ионосферных неоднородностей исследовались многими авторами (см., например, [1–7] и цитируемую там литературу). В экспериментах по модификации F_2 -области ионосферы было установлено, что мелкомасштабные неоднородности с поперечным размером $l_{\perp} \leq \lambda_0 \approx 30 \div 100$ м (λ_0 — длина волны мощного радиоизлучения в вакууме) генерируются при развитии тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости [8–10]. Характеристики этой части спектра искусственных неоднородностей исследуются главным образом с помощью ракурсного рассеяния радиоволн КВ и УКВ диапазонов. Среднемасштабные неоднородности ($l_{\perp} \approx 0,1 \div 1$ км) генерируются за счёт развития самофокусирующей неустойчивости мощных радиоволн [11]. Они вызывают рассеяние радиоволн на неоднородностях в F -области (появление F -рассеяния или F_{spread} на ионограммах) и мерцание сигналов УКВ радиомаяков искусственных спутников Земли. Крупномасштабные (километровые) искусственные неоднородности появляются в результате усиления естественных неоднородностей при нагреве плазмы [3]. Они участвуют в образовании F_{spread} , а также вызывают рефракцию, фокусировку или дефокусировку проходящих через них радиоволн и вариации полного электронного содержания в ионосфере, которые регистрируются, например, с помощью сигналов навигационных спутников систем GPS и ГЛОНАСС [12]. Кроме того, нагрев ионосферы узким пучком мощных радиоволн приводит к изменению концентрации плазмы в пределах диаграммы направленности излучения [13, 14] и к появлению при определённых условиях дактов концентрации плазмы во внешней ионосфере [15].

Несмотря на проведённые многочисленные исследования, свойства неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 100$ м сегодня нельзя считать изученными в достаточной степени. Именно

в этом интервале поперечных размеров наблюдается один из максимумов спектральной интенсивности искусственных флуктуаций плотности плазмы [3, 4, 6], стимулированный с развитием тепловой параметрической неустойчивости, что определяет важность знания их характеристик для развития модели взаимодействия мощных радиоволн с магнитоактивной плазмой. Как показали эксперименты [16–18] исследования свойств этих неоднородностей могут быть выполнены методом ракурсного рассеяния радиоволн на частотах $f \approx 1,5 \div 10$ МГц. Ясно, что из-за сильной рефракции столь низкочастотных радиоволн в ионосфере наиболее просто (без использования многоскачковых трасс зондирования) можно выполнить такие измерения, если приёмопередающий комплекс расположен достаточно близко к нагревному стенду.

В исследованиях, результаты которых представлены в данной работе, ионосфера модифицировалась с помощью нагревного стенда «Сура», расположенного в 100 км к востоку от г. Нижний Новгород (56,15° с. ш., 46,1° в. д.). Возмущённая область ионосферы зондировалась с помощью модифицированного ионозонда «Циклон», расположенного на территории загородной лаборатории Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета (55,85° с. ш., 48,81° в. д.). Ионозонд и возможности его использования описаны в [19]. Этот ионозонд отличается способностью работать в комбинированном режиме, когда в паузу между съёмом ионограмм он переводится в режим импульсного излучения последовательно на 10 частотах с периодичностью излучения на каждой частоте 0,5 с. Ионограммы и результаты зондирования на фиксированных частотах регистрируются в цифровом виде. Предварительные результаты такого зондирования искусственных неоднородностей представлены в [20–22].

В первом разделе работы обсуждаются условия проведения измерений с помощью метода ракурсного рассеяния на трассе «Сура»—Казань и приведены некоторые из уже полученных результатов. Во втором разделе приведены результаты расчётов траекторий радиолучей, показывающие, при каких условиях могут регистрироваться рассеянные сигналы из определённых областей ионосферы. В заключении сформулированы основные выводы.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассматриваемые в настоящей работе эксперименты были в основном выполнены 22–26 августа 2010 года [21, 22]. В качестве примера на рис. 1 приведены ионограммы, полученные 23 августа 2010 года в вечернее время в конце десятиминутной паузы излучения мощной радиоволны (время на ионограмме $T = 19:59$ MSK, панель *a*) и примерно через 60 и 180 с после её включения в момент $T = 20:00$ MSK на частоте 4785 кГц с эффективной мощностью $P_0G \approx 100$ МВт ($T = 20:01$ и $20:03$ MSK, панели *b* и *в* соответственно). На ионограммах видны дополнительные диффузионные следы (рассеянные сигналы) в трёх областях: 1) в диапазоне частот 2,0–4,5 МГц (действующие высоты порядка 280–340 км); 2) в диапазоне частот 4,7–5,5 МГц, на более высоких частотах, чем след О-моды (действующие высоты 350–460 км) и 3) в диапазоне частот 5,4–6,0 МГц, на более высоких частотах, чем след Х-моды (действующие высоты 340–420 км).

Обработка ионограмм и выполненные расчёты траекторий лучей (см. раздел 2) показали, что в первом случае рассеянный сигнал регистрировался с высот $h \approx 200 \div 210$ км, что на 50–60 км ниже высоты отражения мощной радиоволны (волны накачки с частотой $f_{ВН}$), во втором и третьем случаях — с высот, близких к высоте её отражения $h \approx 260$ км. На приведённых ионограммах во время излучения волны накачки регистрируется затемнённая полоса в области частот $f \approx f_{ВН}$, появление которой связано с влиянием отражённого от ионосферы сигнала мощной радиоволны на приёмник ионозонда.

На рис. 2 в качестве примера регистрации рассеянных сигналов из указанных выше областей на фиксированных частотах 2,5; 3,4 и 5,1 МГц приведены динамические сонограммы для каждой

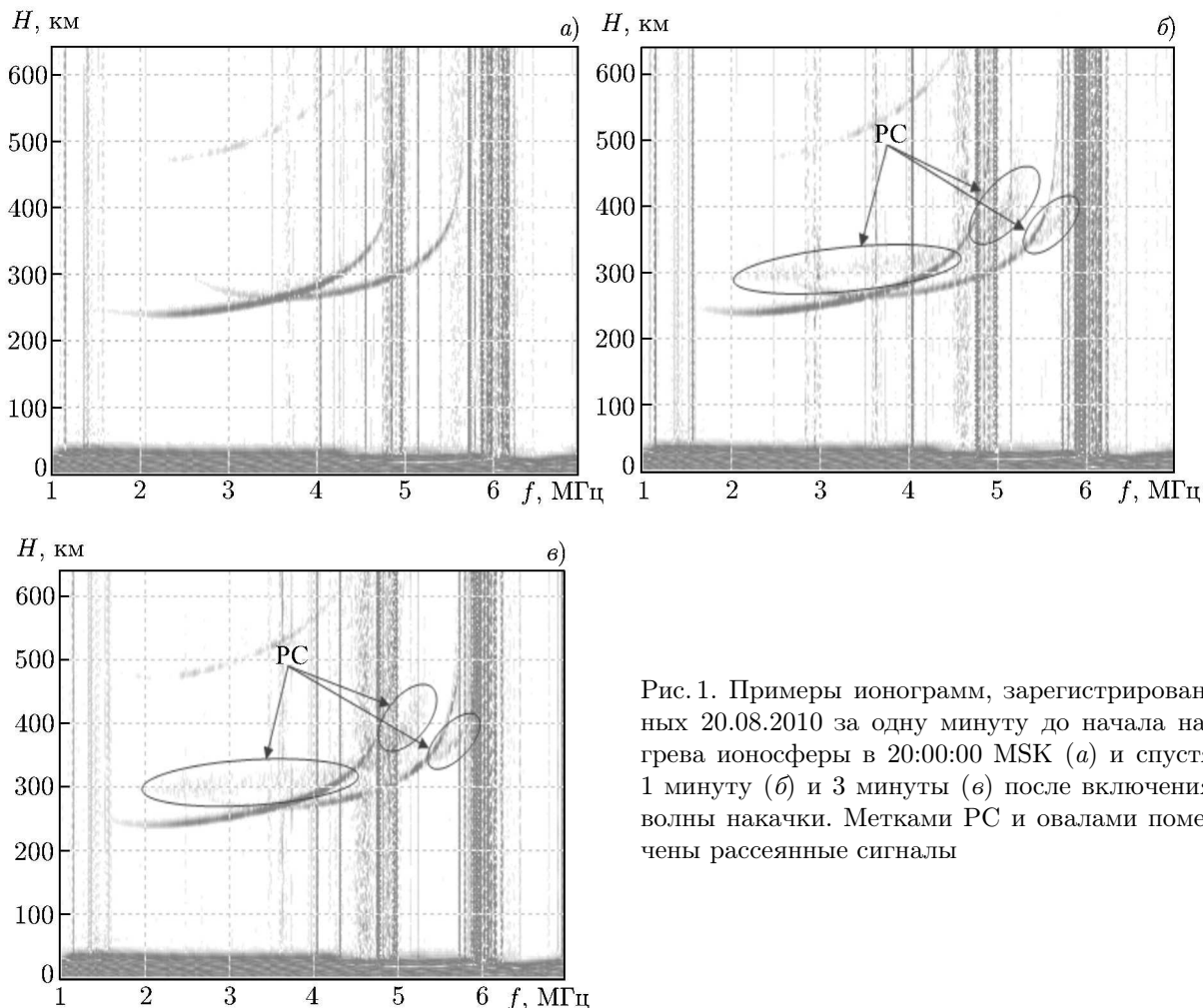


Рис. 1. Примеры ионограмм, зарегистрированных 20.08.2010 за одну минуту до начала нагрева ионосферы в 20:00:00 MSK (а) и спустя 1 минуту (б) и 3 минуты (в) после включения волны накачки. Метками РС и овалами помечены рассеянные сигналы

из частот зондирования для представленного на рис. 1 сеанса измерений с началом модификации ионосферы в $T = 20:00$ MSK и её окончанием в 20:10 MSK. Сонограммы, полученные между съёмом ионограмм, приведены четырьмя группами с длительностью порядка 100 с каждая. Они содержат: момент включения волны накачки (верхний ряд панелей с меткой «вкл»), где видны появление и динамика развития рассеянного сигнала; интервал времени спустя 1–3 мин после начала воздействия (второй ряд панелей), когда уровень рассеяния достигает некоторого стационарного значения; момент выключения волны накачки (третий ряд панелей с отметкой «выкл») и интервал времени спустя 1–3 мин после окончания воздействия (четвёртый ряд панелей), на которых можно проследить за релаксацией рассеянного сигнала.

На рис. 3 приведены ионограммы, полученные 26 августа 2010 года в 17:11 MSK в условиях, когда высотный профиль концентрации плазмы соответствовал дневной ионосфере и в ней присутствовали развитые слои E и F_1 . Модификация ионосферы осуществлялась на частоте $f = 5465$ кГц в режиме 90 с — излучение, 30 с — пауза. Видно появление рассеянного сигнала в трёх достаточно узких частотных интервалах: $3,9 \div 4,4$ МГц (над следом от F_1 -области на ионограмме вертикального зондирования), $5,5 \div 6,0$ МГц (на частотах выше, чем следы О-моды на ионограмме вертикального зондирования) и $6,2 \div 6,7$ МГц (на частотах выше следа Х-моды). Заметим, что рассеянный сигнал в первом диапазоне частот был нерегулярным и имел достаточно слабую интенсивность. Исходя из сильной зависимости действующей высоты рассеянного сигнала от его

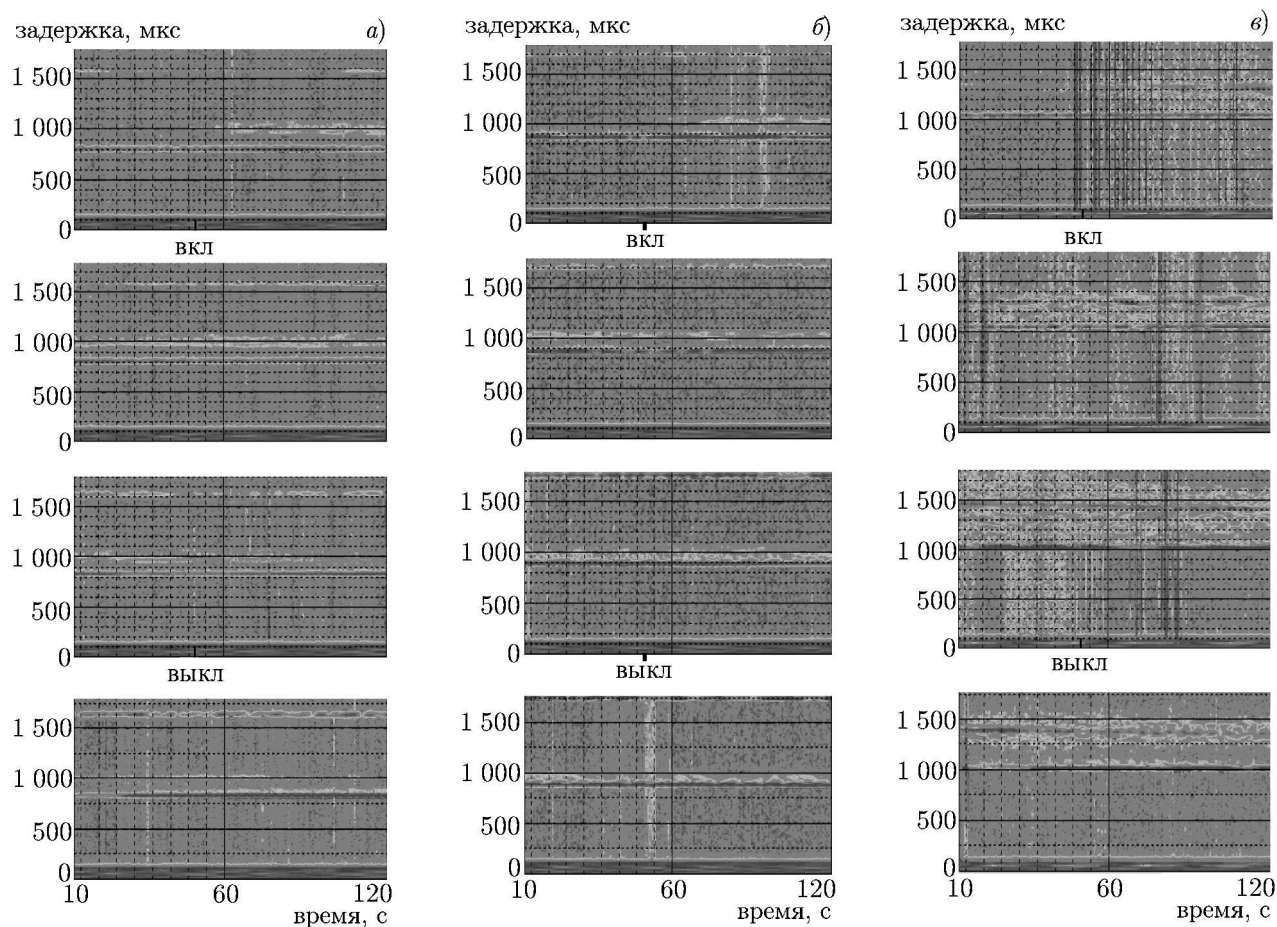


Рис. 2. Фрагменты сонограмм сигналов на частотах 2,5 (а); 3,4 (б) и 5,1 МГц (в), полученные 20.08.2010 для цикла нагрева 20:00:00÷20:10:00 MSK. Светлые области соответствуют большей интенсивности

частоты, можно заключить, что область рассеяния лежала на высотах вблизи максимума слоя F_1 .

Представленные на рис. 1–3 данные, а также другие аналогичные измерения позволили сделать следующие выводы:

1) В условиях коротких радиотрасс рассеянные сигналы от F -области ионосферы (особенно на частотах ниже 4÷5 МГц) появлялись только в отсутствие мощных спорадических E -слоёв, которые экранировали возмущённую область на высотах больше 100÷120 км.

2) В дневные часы рассеянные сигналы наблюдались только на частотах выше 4 МГц; в вечерние и особенно в поздние вечерние часы рассеянные сигналы занимали всё более широкую полосу частот, опускались вниз до 1,4÷2,0 МГц и становились более интенсивными. Последнее естественно связать с суточным изменением поглощения средних и коротких радиоволн в нижней ионосфере (в D и E областях).

3) Характерное время развития рассеянных сигналов изменялось примерно от 5 с до 1÷2 мин в зависимости от частоты зондирующей волны (положения области рассеяния в возмущённой ионосфере) и от условий проведения измерений. Для представленных на рис. 1 и 2 данных (в условиях вечерней ионосферы) это время составляло порядка 7; 10 и 5 с для частот зондирования 2,5; 3,4 и 5,1 МГц соответственно. С учётом результатов расчётов траекторий радиолучей (см. раздел 2) из

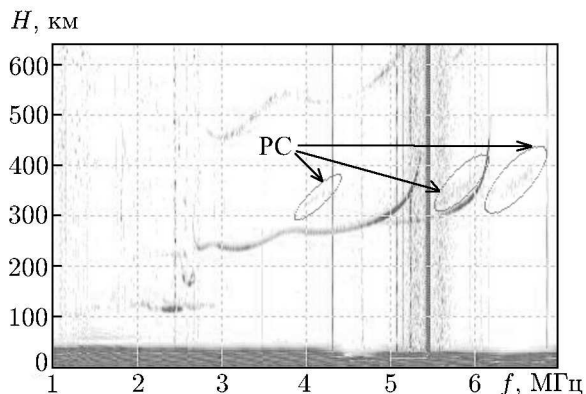


Рис. 3. Пример ионограммы, зарегистрированной в 17:11:00 MSK 26.08.2010 во время нагрева ионосферы. Метками PC и овалами помечены области с рассеянными сигналами

Время релаксации рассеянных сигналов в вечерние часы могло изменяться в широких пределах от десятков секунд до нескольких минут в зависимости от частоты зондирования (размера рассеивающих неоднородностей и положения области рассеяния в возмущённой ионосфере) и от времени проведения измерений. Для представленных на рис. 1 и 2 данных оно составляло примерно 20 с для частоты зондирования 2,5 МГц, порядка 25 с и 3 мин для рассеянных сигналов на частоте 3,4 МГц, регистрируемых с задержками 1,0÷1,1 мс и 0,9÷1,0 мс соответственно, и было порядка 2 и 4 мин для рассеянных сигналов на частоте 5,1 МГц, регистрируемых с задержками 1,3 и 1,4÷1,5 мс соответственно. Полученные характерные времена релаксации искусственных неоднородностей с поперечным размером $l_{\perp} \approx 100 \div 200$ м более отвечают временам второй (медленной) стадии их релаксации (см., например, [4]).

4) Выполненные измерения (см. рис. 2) показали, что рассеянные сигналы сильно флуктуируют по интенсивности с характерными временами порядка 10÷40 с. При скорости дрейфа неоднородностей около 50 м/с это даёт оценку радиуса пространственной корреляции на Земле 0,5÷2 км и степень вытянутости неоднородностей 10÷50. Также из рис. 2 видно, что для частоты 5,1 МГц в конце сеанса нагрева рассеянный сигнал наблюдается в более широком интервале задержек, чем в его начале. Последнее свидетельствует о том, что за 10 мин модификации ионосферы горизонтальный размер области рассеяния увеличивается от 40 км в начале воздействия (размер области, засвеченной пучком мощных радиоволн) до 200 км в его конце (что уже заметно превышает размеры области ионосферы, засвеченной пучком мощных радиоволн).

5) Одним из результатов выполненных исследований явилась довольно частая регистрация уменьшения интенсивности рассеянного сигнала при переходе от начальной стадии его развития к стационарной, величина которого могла достигать 3÷5 дБ при времени его развития порядка нескольких минут, что хорошо видно из рис. 2. Из данных, представленных на рис. 2, также видно, что в конце сеанса нагрева для частоты зондирования 5,1 МГц начинает регистрироваться новая интенсивная компонента рассеяния с задержкой 1,4÷1,5 мс, которая релаксирует более длительное время, чем постоянно наблюдающийся рассеянный сигнал с задержкой порядка 1,3 мс. Дополнительная компонента рассеяния также регистрируется и на частоте 3,4 МГц. В ряде случаев хорошо прослеживается разнонаправленное изменение интенсивности разных компонент рассеянного сигнала. Можно предполагать, что в наших экспериментах все эти эффекты связаны с изменением условий рефракции зондирующих радиоволн во время нагрева ионосферы в

этого следует, что генерация неоднородностей с поперечным размером $l_{\perp} \approx 100 \div 200$ м происходит практически одновременно во всей F_2 -области. При этом агент, вызывающий генерацию искусственных неоднородностей должен распространяться вниз от высоты отражения волны накачки со скоростью, больше или равной 10^6 см/с, что заведомо больше, чем тепловая скорость ионов V_T . Следовательно, появление флуктуаций концентрации плазмы на более низких высотах вызвано не диффузией искусственных возмущений плотности плазмы вниз от высоты отражения мощной радиоволны, где развивается наиболее мощная искусственная ионосферная турбулентность и наблюдаются наиболее интенсивные неоднородности. Этот вывод полностью соответствует ранее полученным результатам [16, 17, 23].

результате формирования полости с пониженной концентрацией плазмы в пределах диаграммы направленности передающей антенны стенда [5, 12, 14] и генерации искусственных неоднородностей километровых масштабов в возмущённой области ионосферы. Это оказывает влияние на изменение пространственного положения области, в которой выполнены условия ракурсного рассеяния.

б) Когда частота мощной радиоволны находилась вблизи 4-й гармоники гирочастоты электронов, достаточно хорошо прослеживалась зависимость интенсивности рассеяния на неоднородностях с размерами $l_{\perp} \approx 100$ м от величины отстройки частоты волны накачки относительно частоты гирогармоники [22]: когда частота мощной радиоволны была несколько ниже $4f_{ce}$ ($\delta f = f_{ВН} - 4f_{ce} = -(10 \div 30)$ кГц), рассеяние сильно подавлялось; при $\delta f \approx 0$ рассеяние хорошо наблюдалось, но имело ещё достаточно слабую интенсивность; наконец, при $\delta f = 10 \div 40$ кГц рассеяние имело наибольшую интенсивность в используемом здесь диапазоне частот мощной радиоволны. С ростом интенсивности рассеяния наблюдалось уменьшение времени развития неоднородностей, вызывающих рассеяние зондирующих радиоволн. В интервале $\delta f = 10 \div 40$ кГц интенсивное рассеяние регистрировалось уже спустя $10 \div 20$ с после начала нагрева ионосферы, причём спустя ещё 60 с интенсивность уменьшалась, демонстрируя overshoot-эффект. При слабом рассеянии (для $\delta f \approx 0$) время нагрева $10 \div 20$ с было явно недостаточным для его развития, и интенсивность рассеяния была заметно больше спустя ещё 60 с. При этом вместе с ростом интенсивности рассеянного сигнала увеличивалась полоса частот его регистрации в диапазоне $5 \div 7$ МГц и уменьшался уровень вариаций интенсивности рассеяния. Такой характер развития рассеяния указывает на сильное уменьшение эффективности генерации неоднородностей с поперечным размером $l_{\perp} \approx 100$ м при отстройках $\delta f \approx -30 \div 0$ кГц по сравнению с отстройками $\delta f = 10 \div 40$ кГц. Аналогичная асимметрия подавления интенсивности искусственных неоднородностей вблизи четвёртой гирогармоники был отмечен ранее в [24] для декаметровых ($l_{\perp} \approx 10 \div 15$ м) неоднородностей.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ ТРАЕКТОРИЙ РАДИОЛУЧЕЙ

Важное место в интерпретации результатов, полученных на коротких радиотрассах для низких частот зондирования, занимают расчёты траекторий радиолучей, позволяющие определить возможности выполнения условий ракурсного рассеяния в различных частях возмущённой области ионосферы в зависимости от частоты зондирования и ионосферных условий. Расстояние от ионозонда до стенда «Сура» составляет 170 км. Особенностью этой трассы является то, что плоскость зондирования для центра возмущённой области почти перпендикулярна плоскости геомагнитного меридиана, проходящей через нагревный стенд. В этом случае условие обратного рассеяния радиоволн фактически сводится к требованию, что в области рассеяния волновой вектор падающей волны должен быть горизонтален, что соответствует наивысшей точке траектории луча.

Всё это позволяет заметно упростить расчёты траекторий с помощью закона Снеллиуса и теоремы Брейта—Тюба, а также приближения плоскостной среды, которое вполне оправдано для такой короткой трассы. Следует отметить, что такие расчёты в рамках весьма упрощённой модели (в ней фактически не учитываются такие факторы, как размеры области рассеяния, угловые характеристики рассеяния из-за конечной степени вытянутости неоднородностей, возможность существования лучей с промежуточным отражением от ионосферы, если плоскость зондирования не перпендикулярна плоскости геомагнитного меридиана, отклонение луча в магнитоактивной плазме от плоскости волновой нормали) приводят к тому, что приведённые ниже расчёты носят, по существу, демонстрационный характер и показывают лишь основные особенности рассеянных

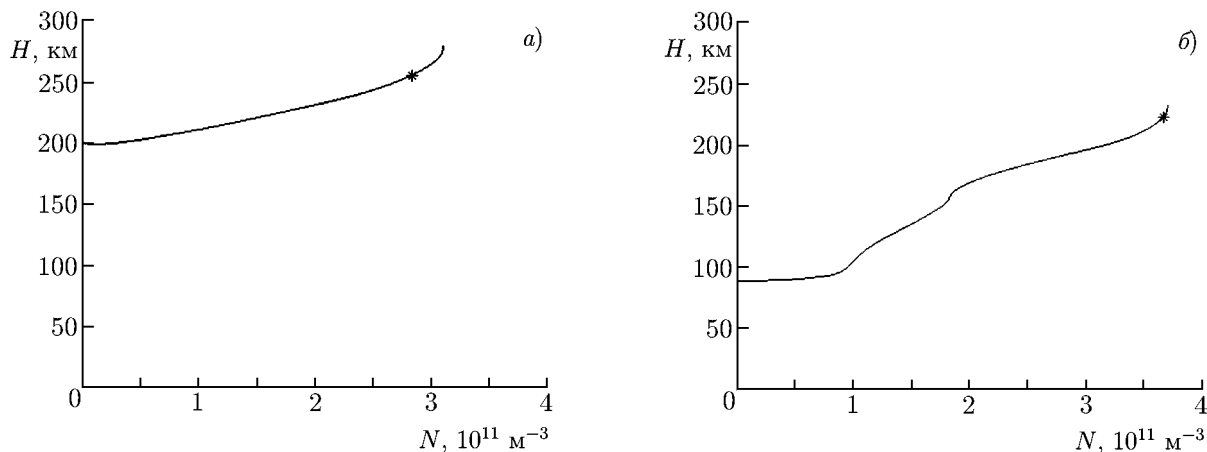


Рис. 4. Восстановленные высотные профили концентрации плазмы для сеансов измерений в 20:10:00 MSK 20.08.2010 (а) и в 17:11:00 MSK 26.08.2010 (б)

сигналов для используемой радиолинии.

Результаты выполненных расчётов мы продемонстрируем для двух случаев: для условий ночной ионосферы, когда высотный профиль электронной концентрации определяется исключительно F_2 -областью (см. рассмотренные в разделе 1 измерения 23 августа 2010 года), и для условий дневной ионосферы, когда высотный профиль электронной концентрации определяется слоями E , F_1 и F_2 (см. рассмотренные в разделе 1 измерения 26 августа 2010 года). Восстановленные из ионограмм высотные профили электронной концентрации для обоих случаев приведены на рис. 4. Звёздочками на профилях отмечены высоты отражения мощной радиоволны для этих сеансов измерений.

Рассмотрим сначала случай вечерней ионосферы (рис. 4а). Обработка ионограмм показала, что высотный профиль концентрации плазмы был близок к параболическому с максимумом на высоте 280 км и полутолщиной порядка 80 км. При этом высота отражения мощной радиоволны на частоте $f = 4785$ кГц составляла 260 км. На рис. 5 для частот зондирования 2,5; 3,4 и 5,1 МГц для волн О- и Х-поляризации построены лучи из приёмопередающего пункта до наивысшей точки, на которой, как было отмечено выше, выполнено условие ракурсного рассеяния. На рис. 5 для рассчитанных лучей также указаны углы излучения (приёма) относительно вертикали и рассчитанные времена распространения волны до точки рассеяния. Здесь также показана диаграмма направленности станда «Сура» для частоты $f = 4785$ кГц по уровню половинной мощности (сплошные линии) и по уровню -10 дБ (пунктирные линии). Уровень -10 дБ более правильно отражает размер области, занятой искусственными неоднородностями при мощностях излучения $P_{эфф} \approx 50 \div 100$ МВт, поскольку пороговые мощности генерации неоднородностей составляют порядка 5 МВт [3, 4].

На основе выполненных расчётов можно заключить, что при такой геометрии рассеяния результаты расчётов слабо зависят от поляризации зондирующей волны. Для частоты зондирования 2,5 МГц рассеяние происходит на высоте $200 \div 205$ км, начальные углы с вертикалью для лучей, попадающих в возмущённую область, составляют $33^\circ \div 45^\circ$, время распространения до точки обратного рассеяния составляет $0,8 \div 1,0$ мс, размеры искусственных неоднородностей $l_{\perp} \approx 170 \div 220$ м; для частоты зондирования 3,4 МГц рассеяние идёт с высот $205 \div 210$ км, углы с вертикалью составляют $29^\circ \div 45^\circ$, время распространения до точки обратного рассеяния составляет $0,8 \div 1,0$ мс, $l_{\perp} \approx 120 \div 180$ м; для частоты зондирования 5,1 МГц рассеяние происходит на высоте $230 \div 250$ км, начальные углы с вертикалью составляют $23^\circ \div 39^\circ$, время распространения до точки обратного рассеяния составляет $1,0 \div 1,1$ мс, $l_{\perp} \approx 90 \div 150$ м. Результаты этих расчётов

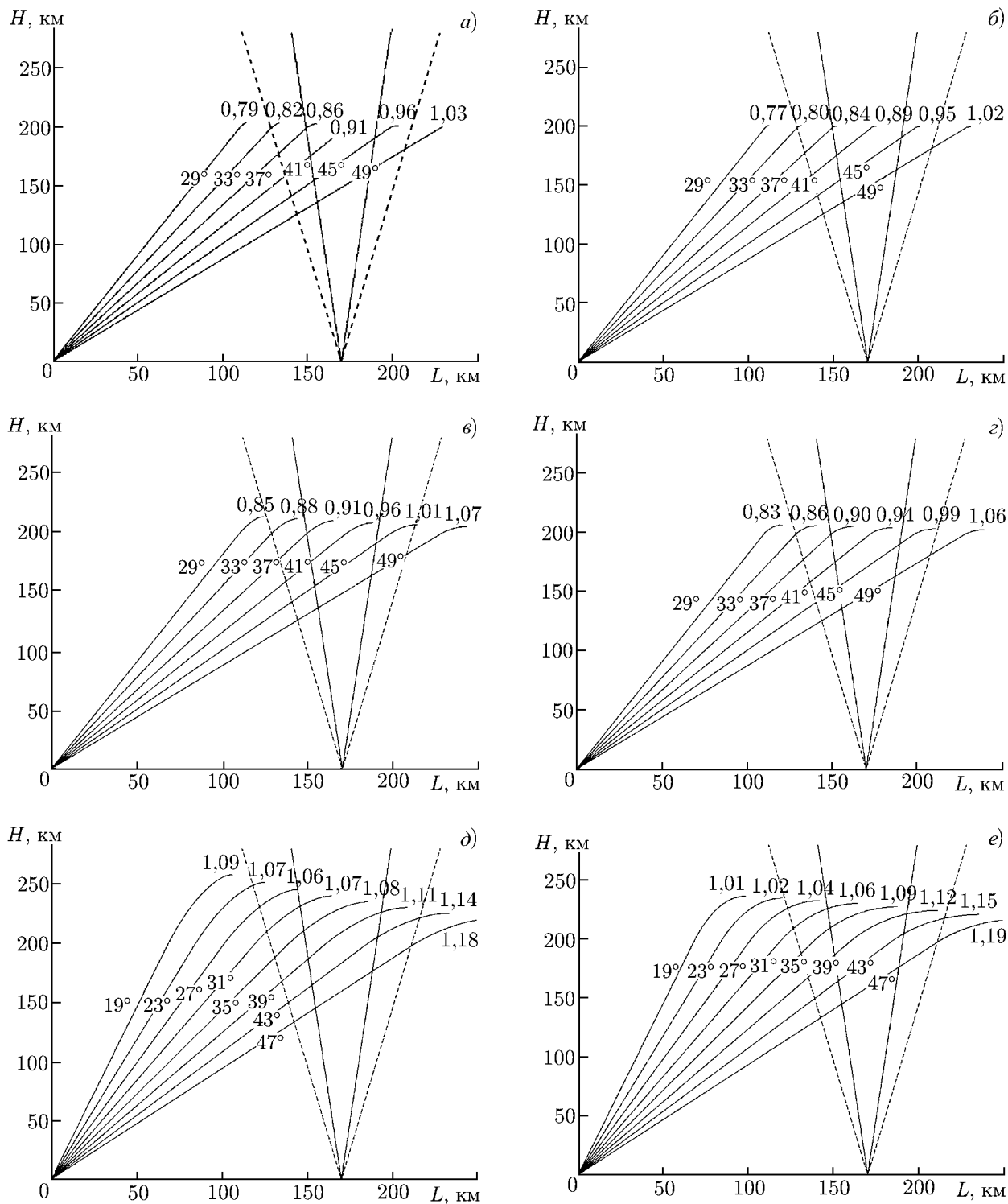


Рис. 5. Расчёт траекторий лучей для трассы Казань—«Сура» для сеанса 20:10:00 MSK 20.08.2010 для частот зондирования 2,5 (а, б), 3,4 (в, г) и 5,1 МГц (д, е) для волн О- (а, в, д) и Х-поляризаций (б, г, е). На рисунке для рассчитанных траекторий указаны углы излучения (приёма) относительно вертикали и рассчитанные времена распространения волны до точки рассеяния в миллисекундах. Положение диаграммы направленности стенда «Сура» для $f_{ВН} = 4785$ кГц по уровню половинной мощности показано сплошными линиями, по уровню -10 дБ — пунктирными линиями

Таблица 1

Частота зондирования, МГц	Высота рассеяния, км	Углы с вертикалью, град	Время распространения, мс	Масштабы искусственных неоднородностей, м
2,5	200÷205	33÷45	0,8÷1,0	170÷220
3,4	205÷210	29÷45	0,8÷1,0	120÷180
5,1	230÷250	23÷39	1,0÷1,1	90÷150

сведены в табл. 1.

Из приведённых данных можно видеть, что рассчитанные времена распространения сигнала до точки рассеяния близки к наблюдаемым, т. е. основное рассеяние происходит в центральной части возмущённой области ионосферы. При этом в диапазоне частот зондирования, где наблюдались рассеянные сигналы, возможно обнаружение искусственных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 90 \div 220$ м (меньшие масштабы для больших частот зондирования) во всём диапазоне высот от подошвы F_2 -слоя ионосферы до высоты отражения мощной радиоволны. Такое зондирование позволяет определять особенности развития неоднородностей на различных высотах и получать информацию о распространении вызванных нагревом ионосферы плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля, как это было продемонстрировано в разделе 1. Получаемые здесь данные важны для изучения особенностей механизмов генерации искусственной ионосферной турбулентности на различных высотах возмущённой ионосферы, в том числе существенно ниже точки отражения волны накачки.

Иная ситуация складывается при зондировании возмущённой области в условиях дневной ионосферы, когда слои E и F_1 (см. высотный профиль электронной концентрации, представленный на рис. 4б) оказывают сильное влияние на траектории лучей на низких частотах зондирования. Выполненные расчёты для представленных на рис. 3 результатов экспериментов показаны на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что рассеяние сигналов в возмущённой области ионосферы на частотах порядка 4,2 МГц (рассеяние на неоднородностях с размером $l_{\perp} \approx 80$ м) для волн О- и Х-поляризации возможно только на высотах E -области ионосферы 90÷120 км. При этом время распространения сигнала должно составлять 0,6÷0,7 мс. Такие сигналы в проведённых экспериментах не были обнаружены за исключением случая, когда присутствовал мощный спорадический E -слой (см. ниже). Спорадически появлялись сигналы с задержкой 1,1÷1,2 мс, которые, как следует из расчётов, могли реализоваться только при наличии сильных искажений лучей с их заходом в более высокие слои ионосферы. Наиболее оптимальные условия рассеяния в рассматриваемом случае должны были существовать на частотах зондирования порядка 5,5 МГц на высотах 170÷190 км при высоте отражения мощной радиоволны около 225 км (рассеяние на неоднородностях с $l_{\perp} \approx 90$ м), что полностью соответствует результатам измерений. Рассеяние на частотах порядка 6,5 МГц для волн О- и Х-поляризации возможно только в западной части возмущённой области (с расстояния вдоль поверхности Земли больше, чем 170 км) на высотах около 200 км. Сигналы с такими характеристиками регулярно регистрировались во время проведённых экспериментов.

В заключение рассмотрим результаты измерений, выполненных 20 августа 2011 года при наличии мощного спорадического E -слоя с частотой экранирования 4,2 МГц и высотой 120 км. На рис. 7 представлены две ионограммы, первая из которых ($T = 20:00$ MSK) была снята в конце двухминутного сеанса нагрева ионосферы на частоте 5 475 кГц (частота волны накачки была примерно на 35 кГц выше частоты четвёртой гирогармоники), вторая ($T = 20:01$ MSK) — через 1 мин после окончания нагрева.

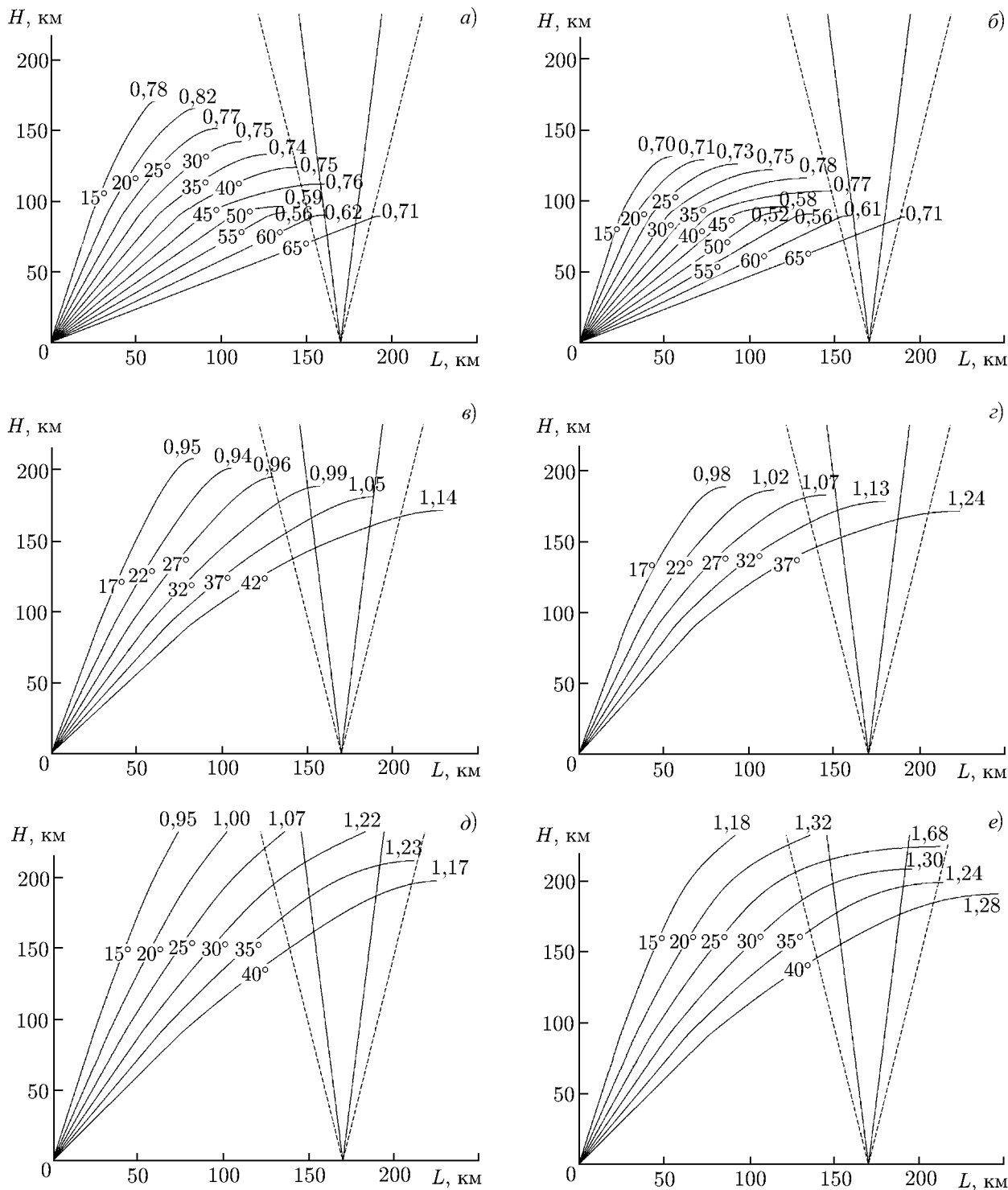


Рис. 6. Расчёт траекторий лучей для трассы Казань—«Сура» для сеанса 17:11:00 MSK 26.08.2010 для частот зондирования 4,2 (а, б), 5,5 (в, г) и 6,5 МГц (д, е) для волн О- (а, в, д) и Х-поляризаций (б, г, е). На рисунке для рассчитанных траекторий указаны углы излучения (приёма) относительно вертикали и рассчитанные времена распространения волны до точки рассеяния в миллисекундах. Положение диаграммы направленности станда «Сура» для $f_{ВН} = 5\,465$ кГц по уровню половинной мощности показано сплошными линиями, по уровню -10 дБ — пунктирными линиями

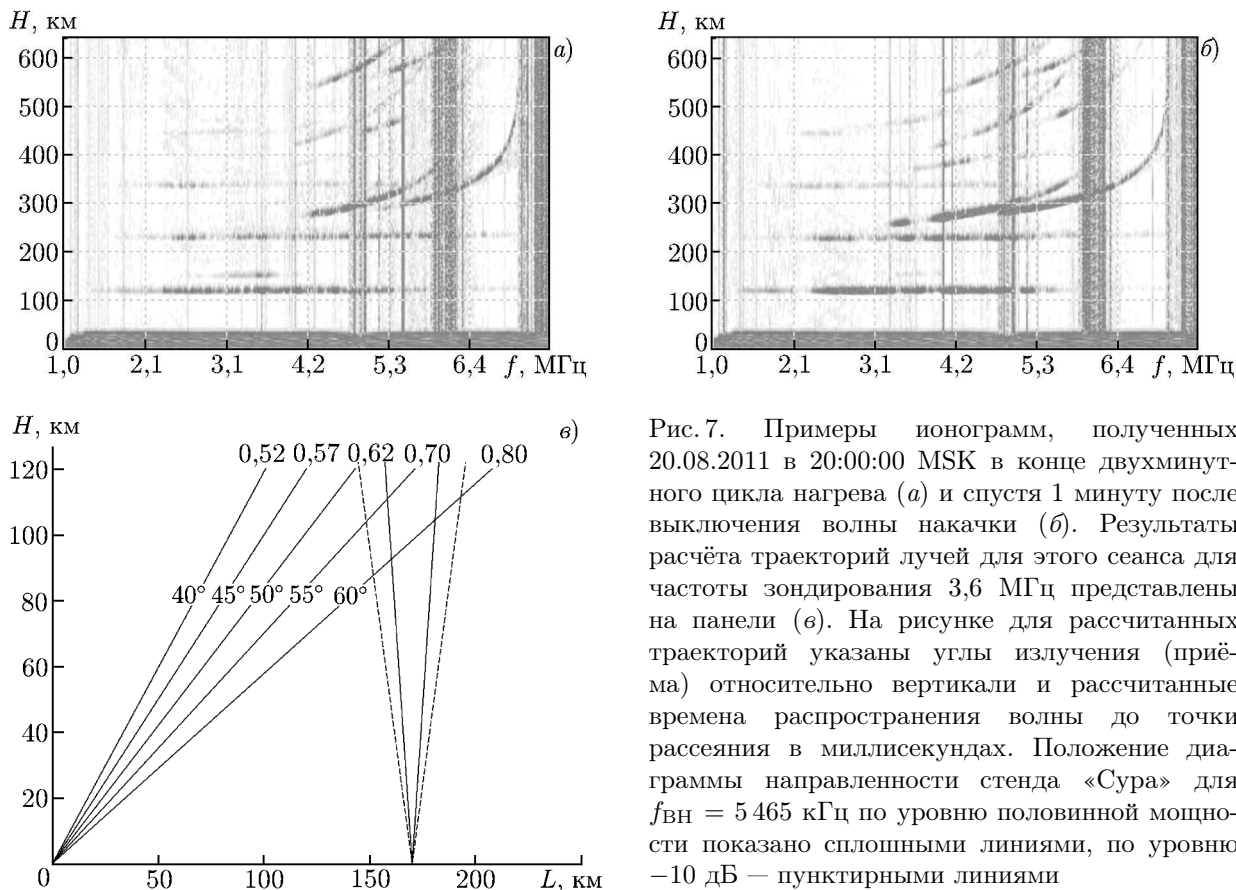


Рис. 7. Примеры ионограмм, полученных 20.08.2011 в 20:00:00 MSK в конце двухминутного цикла нагрева (а) и спустя 1 минуту после выключения волны накачки (б). Результаты расчёта траекторий лучей для этого сеанса для частоты зондирования 3,6 МГц представлены на панели (в). На рисунке для рассчитанных траекторий указаны углы излучения (приёма) относительно вертикали и рассчитанные времена распространения волны до точки рассеяния в миллисекундах. Положение диаграммы направленности станда «Сура» для $f_{ВН} = 5\,465$ кГц по уровню половинной мощности показано сплошными линиями, по уровню -10 дБ — пунктирными линиями

На первой ионограмме хорошо виден рассеянный сигнал на частотах $2,9 \div 3,8$ МГц с задержками $0,49 \div 0,54$ мс и с максимумом интенсивности для частоты $f \approx 3,6$ МГц, величина которой составляла примерно 15% интенсивности зеркально отражённого сигнала. Интенсивность этого рассеянного сигнала уменьшилась за минуту приблизительно в 4–5 раз; в конце трёхминутной паузы рассеянный сигнал не регистрировался. Это позволяет примерно оценить характерное время релаксации рассеянного сигнала как 40 с. На первой ионограмме также виден слабый диффузный рассеянный сигнал ниже X-моды в диапазоне частот $6,4 \div 6,8$ МГц, обычно наблюдаемый и в других экспериментах, свойства которого рассматривались в первом разделе работы.

На рис. 7в приведены результаты расчётов рассеяния для сигналов с частотой 3,6 МГц, которые показывают, что для заданного слоя E_s условие ракурсного рассеяния в центре возмущённой области могло выполняться на высоте около 120 км, но при задержке 0,7 мс, которая на 0,18 мс больше, чем в эксперименте (или область рассеяния смещена на 54 км к востоку от центра возмущённой области). Причина такого большого расхождения результатов эксперимента и расчётов не ясна. Возможно, такое расхождение связано с отличием высотных профилей концентрации плазмы над стандом и над приёмным пунктом, когда реальное рассеяние над стандом происходило на высотах $90 \div 100$ км (к сожалению, ионозонд на станде «Сура» не работал во время проводимых измерений). В противном случае приходится допускать смещение области рассеяния далеко на восток от центра возмущённой области. Несмотря на существующую неясность, полученные данные свидетельствуют о том, что в выполненных экспериментах мощное коротковолновое радиоизлучение воздействовало на полупрозрачный спорадический слой E , так что в нём происходила генерация неоднородностей с размером $l_{\perp} \approx 50 \div 70$ м. В целом, приведённые выше данные соответствуют результатам такого воздействия, опубликованным в [25].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные эксперименты и расчёты траекторий радиолучей продемонстрировали широкие возможности, которые открывает использование коротких радиотрасс для обнаружения искусственных ионосферных неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 100 \div 200$ м на основе штатных средств вертикального зондирования ионосферы. Показано, что в приёмопередающем пункте, расположенном около г. Казань в 170 км к востоку от стенда «Сура», можно регулярно измерять характеристики рассеяния на различных высотах F -области как в дневных, так и в вечерних (ночных) условиях, а также изучать влияние мощного коротковолнового радиоизлучения на спорадический E -слой ионосферы. Такого рода эксперименты позволяют изучать характеристики развития и релаксации искусственных неоднородностей на разных высотах, что даёт информацию о распространении возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля и механизмах генерации неоднородностей, а также изучать пространственную структуру возмущённой области ионосферы. Эти задачи остаются актуальными и сегодня, и здесь планируется проведение новых экспериментов с учётом уже накопленного опыта выполнения подобного рода работ, а также привлечение для них ионозонда, расположенного около г. Йошкар-Ола в 120 км к востоку от стенда «Сура». Следует подчеркнуть, что эксперименты с использованием коротких трасс зондирования отличаются тем, что адекватная интерпретация полученных данных здесь возможна только на основе расчётов траекторий радиолучей с использованием реального высотного профиля концентрации плазмы.

Необходимо отметить, что ряд полученных нами результатов не может быть объяснён на основе расчётов, выполненных в рамках используемой упрощённой модели невозмущённой плоскостной ионосферы. Для их интерпретации необходимо, в первую очередь, учесть в модели среды распространения регулярные и нерегулярные изменения концентрации плазмы с различными пространственными масштабами, возникающие в ионосфере под воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения. Это увеличение концентрации плазмы в пределах диаграммы направленности пучка мощных радиоволн на высотах 130–150 км в дневной ионосфере [13], её уменьшение вблизи уровня отражения мощной радиоволны в F_2 -области [5, 14], неравномерность нагрева плазмы и генерации неоднородностей в пределах диаграммы направленности пучка мощных радиоволн (выделенность области магнитного зенита) [26], а также существование областей с резким усилением интенсивности электрического поля волны накачки (каустик) [27], генерация крупномасштабных неоднородностей концентрации плазмы и др. Решение подобного рода задач с усложнением модели среды распространения, нацеленных на получение более адекватной интерпретации экспериментальных данных, является предметом следующего этапа наших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08–02–00171, 11–02–00374) и Министерства образования и науки РФ (гос. контракт 16.518.11.7066). Авторы благодарят сотрудников стенда «Сура» за помощь в проведении исследований и В. Н. Бубукину за помощь в обработке ионограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fialer P. A. // Radio Sci. 1974. V. 9. P. 923.
2. Minkoff J., Kugelmann P., Weissman I. // Radio Sci. 1974. V. 9. P. 941.
3. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208.

4. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Metelev S. A., Sergeev E. N. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59, No. 18. P. 2317.
5. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // УФН. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
6. Basu S., Costa E., Livingston R. C., et al. // J. Geophys. Res. A. V. 102, No. 4. P. 7469.
7. Мясников Е. Н., Муравьева Н. В., Сергеев Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44, № 11. С. 903.
8. Васьков В. В., Гуревич А. В. // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. С. 176.
9. Грач С. М., Караштин А. Н., Митяков Н. А. и др. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. С. 1321.
10. Das A. C., Fejer J. A. // J. Geophys. Res. A. 1979. V. 84. P. 6701.
11. Васьков В. В., Гуревич А. В. // Геомагнетизм и аэрономия. 1976. Т. 16. С. 50.
12. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Куницын В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 7. С. 421.
13. Бойко Г. Н., Васьков В. В., Голян С. Ф. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 8. С. 960.
14. Tereshchenko E. D., Khudukon V. Z., Gurevich A. V., et al. // Phys. Lett. A. 2004. V. 325. P. 381.
15. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, вып. 12. С. 908.
16. Бахметьева Н. В., Гончаров Н. П., Игнатьев Ю. А. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29. С. 799.
17. Бахметьева Н. В., Игнатьев Ю. А., Дмитриев С. А., Шавин П. Б. // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. С. 180.
18. Hedberg Å., Derblom H., Thidé B., et al. // Radio sci. 1983. V. 18, No. 6. P. 840.
19. Акчурин А. Д., Юсупов К. М. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Информатика. Телекоммуникации. Управление». 2010. Вып. 5 (108). С. 49.
20. Акчурин А. Д., Ким В. Ю., Панченко В. А. и др. // XXII Всерос. конф. по распространению радиоволн. Ростов-на-Дону, 2008. Т. 2. С. 175.
21. Акчурин А. Д., Зыков Е. Ю., Юсупов К. М. и др. // XXIII Всерос. конф. по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2011. Т. 2. С. 185.
22. Фролов В. Л., Болотин И. А., Урядов В. П. и др. // XXIII Всерос. конф. по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2011. Т. 2. С. 285.
23. Фролов В. Л., Сергеев Е. Н., Штуббе П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 2. С. 121.
24. Ronomarenko P. V., Leyser T. V., Thidé B. // J. Geophys. Res. A. 1999. V. 104. P. 10081.
25. Фролов В. Л., Каган Л. М., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 12. С. 999.
26. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
27. Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., et al. // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. Art. no L18107.

Поступила в редакцию 8 ноября 2011 г.; принята в печать 23 января 2012 г.

DIAGNOSTICS OF ARTIFICIAL IONOSPHERIC IRREGULARITIES USING SHORT SOUNDING RADIO PATHS

I. A. Bolotin, V. L. Frolov, A. D. Akchurin, E. Yu. Zykov, and K. M. Yusupov

In this work, we consider the possibilities of diagnostics of artificial ionospheric irregularities with the transverse size $l_{\perp} \approx 50\text{--}200$ m, which are excited in the Earth's ionosphere by high-power short-wave radio-frequency radiation from the "Sura" facility using the method of vertical sounding of the ionosphere by the ionosonde located near the heating facility. Some results of the performed studies showing the features of such a diagnostics are presented.