УДК 533.951+537.868

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗМУЩЁННОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЛОКАЦИИ В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ И ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Е. Н. Сергеев [1,5], *Е. Ю. Зыков* [2], *А. Д. Акчурин* [2], *И. А. Насыров* [2], *Г. Г. Вертоградов* [3], *В. Г. Вертоградов* [3], *В. Ю. Ким* [4], *В. П. Полиматиди* [4], *С. М. Грач* [1,5]

[1] Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород;
[2] Казанский федеральный университет, г. Казань;
[3] Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону;
[4] Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, г. Троицк Московской области;
[5] Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты одновременных исследований динамики искусственных неоднородностей плазмы в интервале поперечных к магнитному полю декаметровых масштабов $l_\perp \approx 7 \div 125$ м и диагностического искусственного радиоизлучения ионосферы, выполненных в нагревных экспериментах на стенде «Сура» и ряде удалённых пунктов приёма ракурсно рассеянных сигналов. Проведён анализ и сопоставление суточной зависимости времён развития и релаксации неоднородностей и диагностического радиоизлучения ионосферы.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования динамических и спектральных характеристик низкочастотной искусственной ионосферной турбулентности активно проводились в 70–90-е годы прошлого столетия в рамках экспериментов по мощному воздействию коротковолнового излучения на ионосферную плазму на нагревных стендах США, Норвегии и России [1–11]. Несмотря на большое количество выполненных исследований эволюции мелкомасштабных искусственных неоднородностей плазмы с поперечными к геомагнитному полю размерами меньше 100 м [4–11], до сих пор не закрыт вопрос о спектральных и динамических характеристиках неоднородностей плазмы с пространственными масштабами порядка длины волны накачки λ_0, где должен наблюдаться локальный максимум в пространственном спектре низкочастотной плазменной турбулентности.

Развитие в последние годы диагностической техники для возвратного наклонного зондирования возмущённой области ионосферы на коротких радиотрассах [12, 13] предоставило возможность изучить динамику спектра неоднородностей плазмы в данной области пространственных масштабов и сопоставить данные с результатами других исследований, проводимых, в частности, с помощью измерений характеристик искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) [14–24]. Искусственное радиоизлучение наблюдается в достаточно широком интервале частот в спектре отражённого сигнала волны накачки и определяется развитием как высокочастотной (плазменные волны), так и низкочастотной (искусственные неоднородности) турбулентности ионосферной плазмы. Как показано в [11, 17–19, 23, 25], динамика ИРИ коррелирует с развитием аномального ослабления волны накачки и пробных радиоволн при вертикальном зондировании ионосферы, а также с эволюцией радиосигналов, ракурсно рассеянных от искусственных неоднородностей различных размеров в возмущённой области ионосферы при её наклонном зондировании.

Однако сопоставление динамических характеристик искусственной ионосферной турбулентности, полученных с помощью различных методов её диагностики, не всегда давало возможность

сделать однозначные выводы, в частности, о характере суточной зависимости времён релаксации различных спектральных компонент турбулентности [11, 16, 24]. В настоящей работе проводится анализ данных одновременных измерений динамических характеристик ИРИ и мелкомасштабных искусственных неоднородностей плазмы с поперечными к геомагнитному полю масштабами $l_\perp \approx 7 \div 125$ м, проведённых с помощью ракурсного рассеяния коротковолновых радиосигналов, на стадиях развития и релаксации возмущений в ионосфере при её нагреве и последующем диагностическом зондировании.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

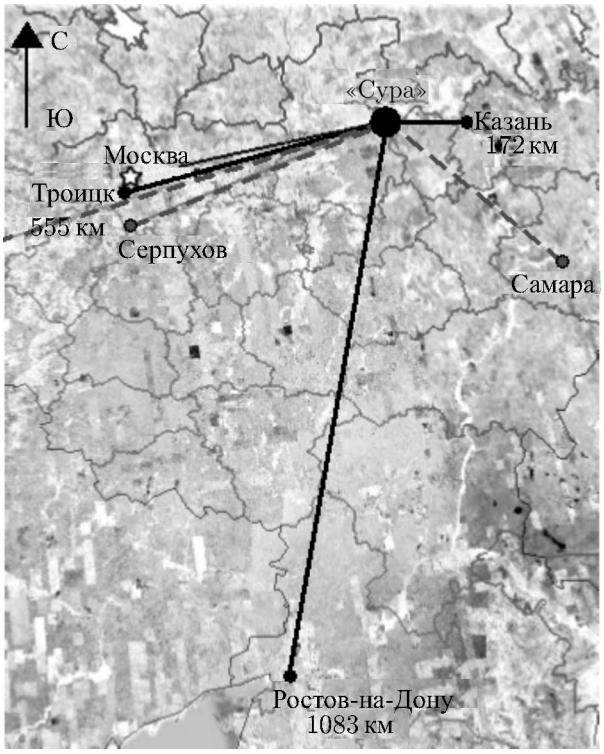

Рис. 1. Геометрия расположения пунктов приёма ракурсно рассеянных волн относительно нагревного стенда «Сура»

Комплексные эксперименты по исследованию динамики низкочастотной ионосферной турбулентности, создаваемой над стендом «Сура» (г. Васильсурск Нижегородской области) были проведены в 2009–2010 годах. Всего выполнено четыре серии измерений — 19–24 июня 2009 года и 14–15 мая, 1–7 сентября и 20–24 сентября 2010 года. Непосредственно под возмущённой областью проводились измерения динамических характеристик ИРИ. Для этого режимы квазинепрерывного нагрева плазмы с длительностью от 1÷3 до 20 мин чередовались либо с режимами её диагностического зондирования импульсами с различной длительностью $\tau_и = 0{,}2 \div 20$ мс и периодом повторения $T_и = 0{,}1 \div 2$ с либо с общей паузой в излучении. Диагностические импульсы с большой скважностью излучения использовались, в частности, для изучения эффективности поддержания генерации искусственных неоднородностей на стадии их релаксации после окончания квазинепрерывного нагрева [26]. Для нагрева использовалось излучение обыкновенной поляризации на частотах $f_0 = 4\,550$ и $4\,600$ кГц (2009 год), $4\,740$, $4\,785$ и $5\,600$ кГц (2010 год) в зенит либо с наклоном диаграммы направленности стенда на 12° на юг (май 2010 год). Сигналы ИРИ регистрировались в приёмном пункте, расположенном примерно в 1 км от стенда, с использованием широкополосного цифрового приёмника [21].

Сигналы ракурсно рассеянных волн принимались в ряде пунктов. Схема расположения приёмных пунктов представлена на рис. 1. Для зондирования декаметровых искусственных неоднородностей плазмы с размерами $l_\perp \approx 20 \div 125$ м на 5–10 фиксированных частотах радиоизлучения в диапазоне 2÷7 МГц использовался приёмопередающий комплекс коротковолновой локации ионосферы «Циклон-GPS» вблизи г. Казань (обсерватория Казанского университета, расстояние до нагревного стенда порядка 170 км). Более подробно методика измерений в Казани рассмотрена в [13]. Для зондирования искусственных неоднородностей с размерами $l_\perp \approx 7 \div 15$ м использовался ряд трасс различной протяжённости с регистрацией ракурсно рассеянных волн в диапазоне частот 10÷22 МГц в приёмных пунктах в г. Троицк (ИЗМИРАН, расстояние до нагревного стенда

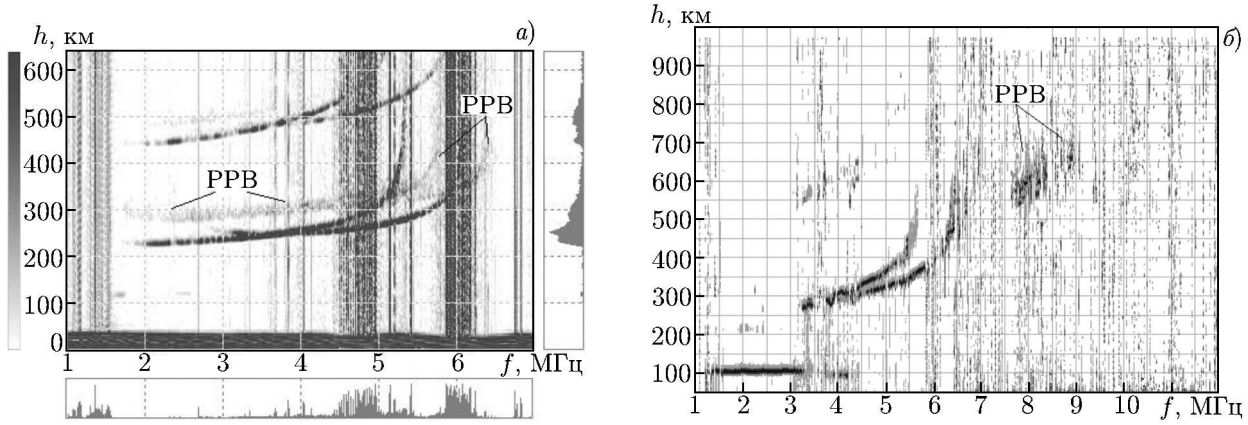

Рис. 2. Пример ионограмм, снятых во время непрерывной работы нагревного стенда «Сура» ($f_0 = 4\,740$ кГц) вблизи Казани в 19:00 MSK 20.09.2010 (*а*) и в Троицке в 22:10 MSK 06.09.2010 (*б*). Надписи PPB обозначают ракурсно рассеянные волны

порядка 560 км) и г. Ростов-на-Дону (физическая лаборатория «Сигнал» Южного федерального университета, расстояние до нагревного стенда 1 080 км). Кроме того, в Троицке отрабатывалась методика регистрации сигналов возвратного наклонного рассеяния при использовании ионосферной станции «Базис» для коротковолновой локации в диапазоне частот 7÷12 МГц.

Пример ионограмм, снятых под Казанью и в Троицке во время работы передатчиков стенда «Сура» приведён на рис. 2, где наряду с обыкновенной (O) и необыкновенной (X) поляризационными модами вертикального зондирования наблюдаются более слабые рассеянные сигналы с частотами, превышающими критические частоты для сигналов вертикального зондирования. Для Троицка частоты ракурсно рассеянных волн составляют в данном случае 7,5÷9 МГц, и весьма существенно превышают критическую частоту F-слоя для X-моды $f_{F_2} = 6{,}5$ МГц.

Для исследования динамики рассеянных сигналов ионозонды переводились в режим зондирования на нескольких фиксированных частотах с периодом повторения излучаемых зондирующих импульсов 0,25÷0,5 с, определяющим временно́е разрешение процессов рассеяния радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях. Временна́я задержка при приёме рассеянных сигналов возвратно-наклонного зондирования определяется действующим расстоянием до возмущённой области ионосферы, формируемой над стендом «Сура». Как правило, задержка близка к или превышает временну́ю задержку импульсных сигналов при вертикальном зондировании ионосферы.

На рис. 3 приведён пример регистрации рассеянных сигналов на 8 фиксированных частотах во время работы нагревного стенда «Сура» на частоте $f_0 = 4\,785$ кГц. Вертикальные тёмные полосы на частотах, близких к частоте волны накачки (в частности, при $f = 4\,510$ кГц), вызваны влиянием мощного сигнала на тракты приёмной аппаратуры. Техника измерений характеристик ракурсно рассеянных волн в лаборатории Южного федерального университета (Ростов-на-Дону) описана в [27, 28], была ранее протестирована в многочисленных измерениях и включает в себя автоматизированную систему многочастотного приёма, цифровой регистрации и динамического спектрального (доплеровского) анализа сигналов различных стационарных радиостанций в диапазоне 12÷22 МГц.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В серии измерений 2010 года основное внимание было уделено исследованию зависимости характерных времён релаксации интенсивности рассеянных сигналов от времени суток и сопостав-

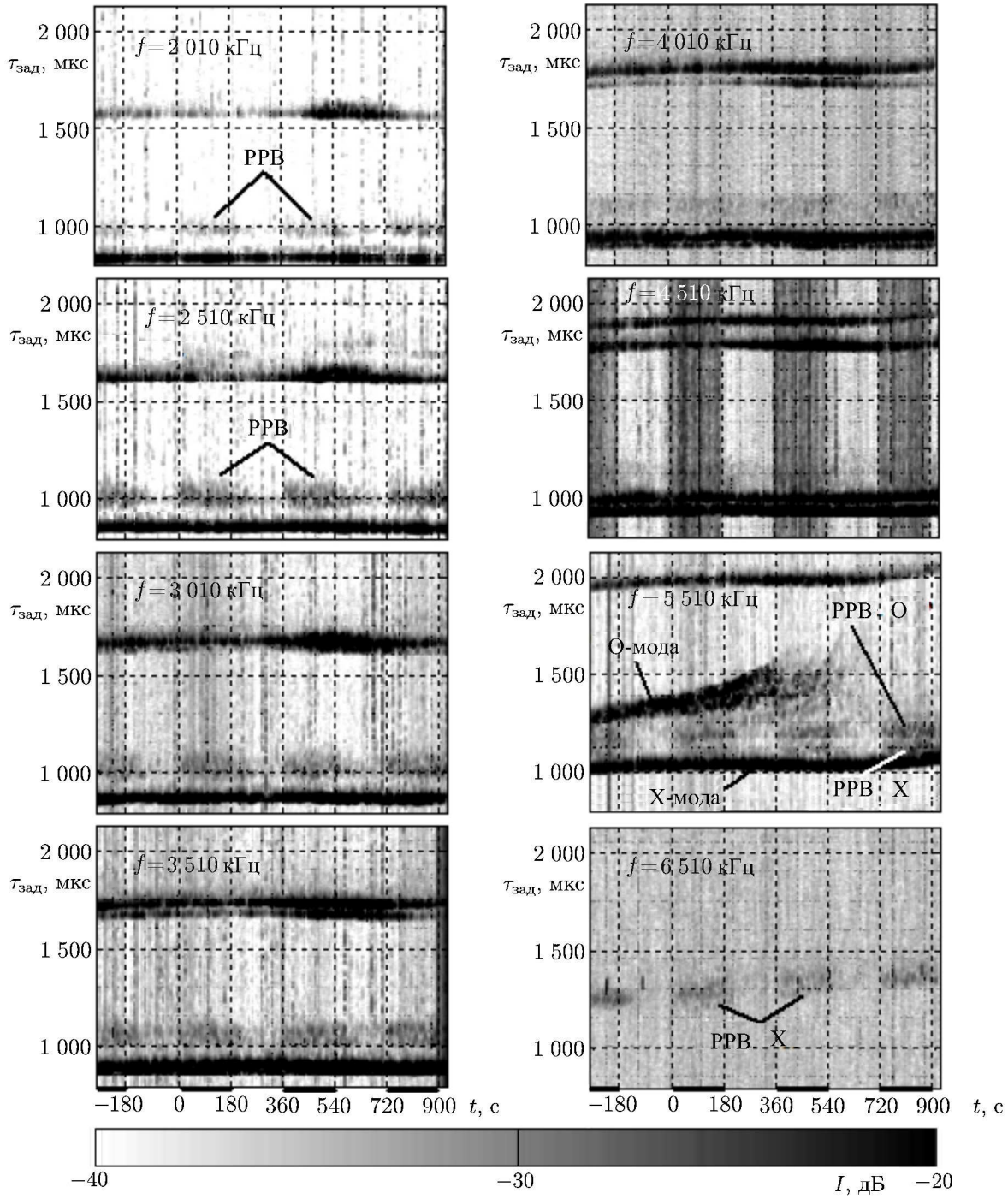

Рис. 3. Пример динамики сигналов вертикального зондирования и рассеянных сигналов (РРВ) от возмущённой области над стендом «Сура» на восьми фиксированных частотах, принятых под Казанью 14 мая 2010 года, 22:50 MSK. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат — временна́я задержка для отражённых и рассеянных импульсных сигналов $\tau_{зад}$, оттенками серого показан уровень интенсивности I. Наряду с непрерывными линиями, отвечающими сигналам кратных отражений О- и Х-мод при вертикальном зондировании ионосферы, на панелях показаны сигналы О- и Х-поляризованных рассеянных волн при возвратно-наклонном зондировании возмущённой области над стендом «Сура», отвечающие трёхминутным интервалам нагрева. Интервалы нагрева помечены чёрными линиями на оси абсцисс

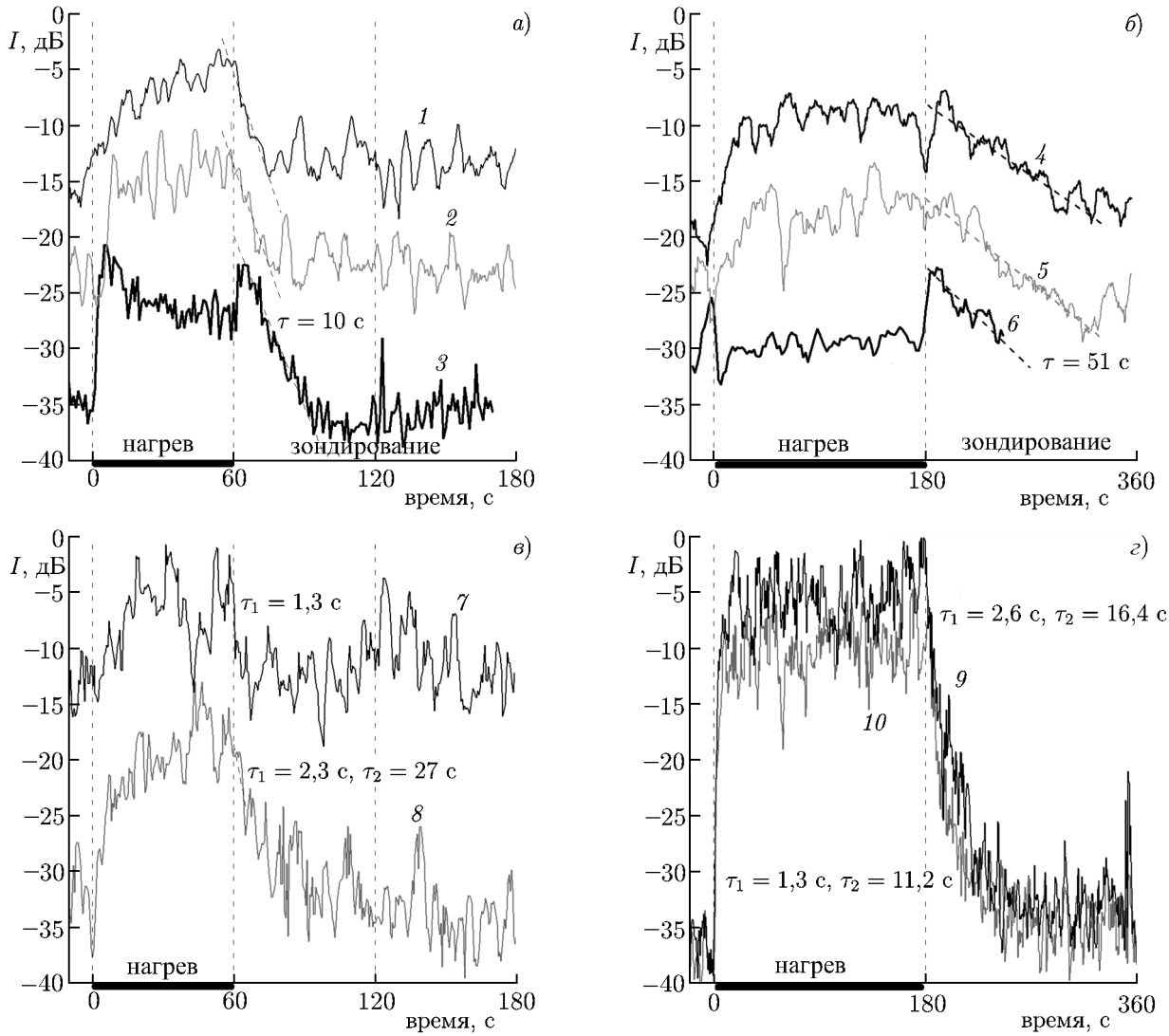

Рис. 4. Пример эволюции рассеянных сигналов (кривые *1*, *2*, *4*, *5*, *7*–*10*) и главного спектрального максимума ИРИ (кривые *3*, *6*). Кривые *1*–*3*, *7*, *8* получены 06.09.2010, частота нагрева $f_0 = 5\,600$ кГц (кривые *1*–*3*, *7* — в 15:31 MSK, кривая *8* — в 15:42 MSK), мощность $P_0 = 60$ МВт (текущее усреднение по 5 точкам). Кривые *4*–*6*, *9*, *10* получены в 22:31 MSK 15.05.2010, $f_0 = 4\,785$ кГц, $P_0 = 120$ МВт (текущее усреднение по 21 точке). Кривая *1* соответствует $f = 6\,100$ кГц, *2* — $f = 6\,600$ кГц, *3* — $\Delta f = -11$ кГц, *4* — $f = 5\,510$ кГц, *5* — $f = 2\,010$ кГц, *6* — $\Delta f = -9$ кГц, *7*, *9* — $f = 14\,996$ кГц, *8* — $f = 15\,510$ кГц, *10* — $f = 15\,465$ кГц. Соответствующие времена релаксации указаны на рисунке

лению их с динамическими характеристиками диагностического ИРИ. На рис. 4 приведён пример такого сопоставления для нескольких частот ракурсно рассеянных волн и отстройки ИРИ $\Delta f = f_{\text{ИРИ}} - f_0$ в области главного спектрального максимума ($\Delta f_{\text{М}} = -(9 \div 11)$ кГц) для дневных (*а*, *в*) и ночных (*б*, *г*) часов наблюдений. В данном случае осциллограмма ИРИ приведена на рис. 4*а*, *б* вместе с осциллограммами сигналов для частот зондирующих сигналов, отвечающих максимальным диагностируемым декаметровым размерам рассеивающих неоднородностей (Казань). На рис. 4*в*, *г* показана динамика рассеянных сигналов для более высоких частот (меньших размеров рассеивающих неоднородностей), наблюдавшихся в Ростове-на-Дону.

Если интенсивность рассеянных сигналов, определяемых динамикой неоднородностей плазмы, как правило, развивается и релаксирует монотонно (см. рис. 4), то в эволюции интенсивно-

сти ИРИ может наблюдаться характерный максимум как на стадии генерации неоднородностей плазмы, так и при их релаксации. Формирование временно́го максимума ИРИ и последующее подавление излучения (overshoot-эффект) связываются с двойственной ролью мелкомасштабных искусственных неоднородностей плазмы как источника, поддерживающего генерацию ИРИ, так и депрессора излучения [15, 16, 18, 19, 23].

В данном примере обращает на себя внимание близость характерных времён релаксации интенсивности рассеянных сигналов, отвечающих максимальным декаметровым размерам неоднородностей, и диагностического ИРИ в режиме импульсного зондирования после выключения нагрева. Эти времена существенно возрастают при переходе от дневных к ночным условиям наблюдений. Для более высоких частот ракурсно рассеянных волн (меньших пространственных масштабов неоднородностей) такой зависимости не наблюдалось.

Здесь сразу следует отметить и тот факт, что в проведённой серии измерений при использовании различных режимов диагностического зондирования ионосферной плазмы на стадии релаксации турбулентности не наблюдалось эффектов поддержания уровня искусственной низкочастотной турбулентности, возбуждаемой при нагреве, во всей области диагностируемых размеров ($l_\perp \approx 7 \div 125$ м). Данный вывод сделан на основе сопоставления процессов релаксации интенсивности рассеянных сигналов при использовании диагностического зондирования после нагрева и в контрольных сеансах нагрева с общей паузой (отсутствием зондирования), проводимых раз в 30 мин.

Весь массив данных измерений характеристик ракурсно рассеянных волн и ИРИ был обработан с целью детального исследования суточной зависимости характерных времён релаксации интенсивности сигналов (уменьшения в e раз). Результаты обработки представлены на рис. 5*а*, *б*. Для трассы Казань—Васильсурск—Казань плоскость распространения ракурсно рассеянных волн удачно расположена практически перпендикулярно плоскости магнитного меридиана, поэтому поперечные размеры рассеивающих искусственных неоднородностей плазмы для частот зондирования ниже критических частот F-слоя могут быть определены как [26]:

$$l_\perp = \lambda_{\text{РРВ}}/(2n), \tag{1}$$

где $\lambda_{\text{РРВ}}$ и n — длина ракурсно рассеянной волны и показатель преломления плазмы на высоте рассеяния, совпадающей с высотой отражения. Показатель преломления определяется углом падения α зондирующего сигнала на ионосферный слой:

$$n = \sin\alpha = d/L_{\text{д}}. \tag{2}$$

Здесь d — расстояние между проекцией центра возмущённой области на поверхность Земли и пунктом возвратно-наклонного зондирования (172 км), $L_{\text{д}}$ — действующее расстояние до области рассеяния, определяемое по времени задержки принимаемого рассеянного сигнала. Для условий измерений $n \approx 0{,}5$. Диапазону зондирующих частот 2÷6,6 МГц соответствуют размеры рассеивающих неоднородностей $l_\perp \approx 45 \div 130$ м.

Для более высоких частот рассеянных сигналов для коротковолновых трасс Москва—Васильсурск—Ростов-на-Дону и аналогичных (см. рис. 1) пространственные масштабы рассеивающих неоднородностей определяются углом рассеяния θ:

$$l_\perp = \lambda_{\text{РРВ}}/[2\sin(\theta/2)]. \tag{3}$$

Соответствующие масштабы для частот 12÷21,6 МГц составляют $l_\perp \approx 7 \div 15$ м.

Как видно из рис. 5*а*, времена релаксации неоднородностей с размерами $l_\perp \approx \lambda_0$ начиная с 17:00 MSK монотонно возрастают более чем в 10 раз от значений $\tau \approx 5 \div 15$ с до $\tau \approx 100 \div 200$ с

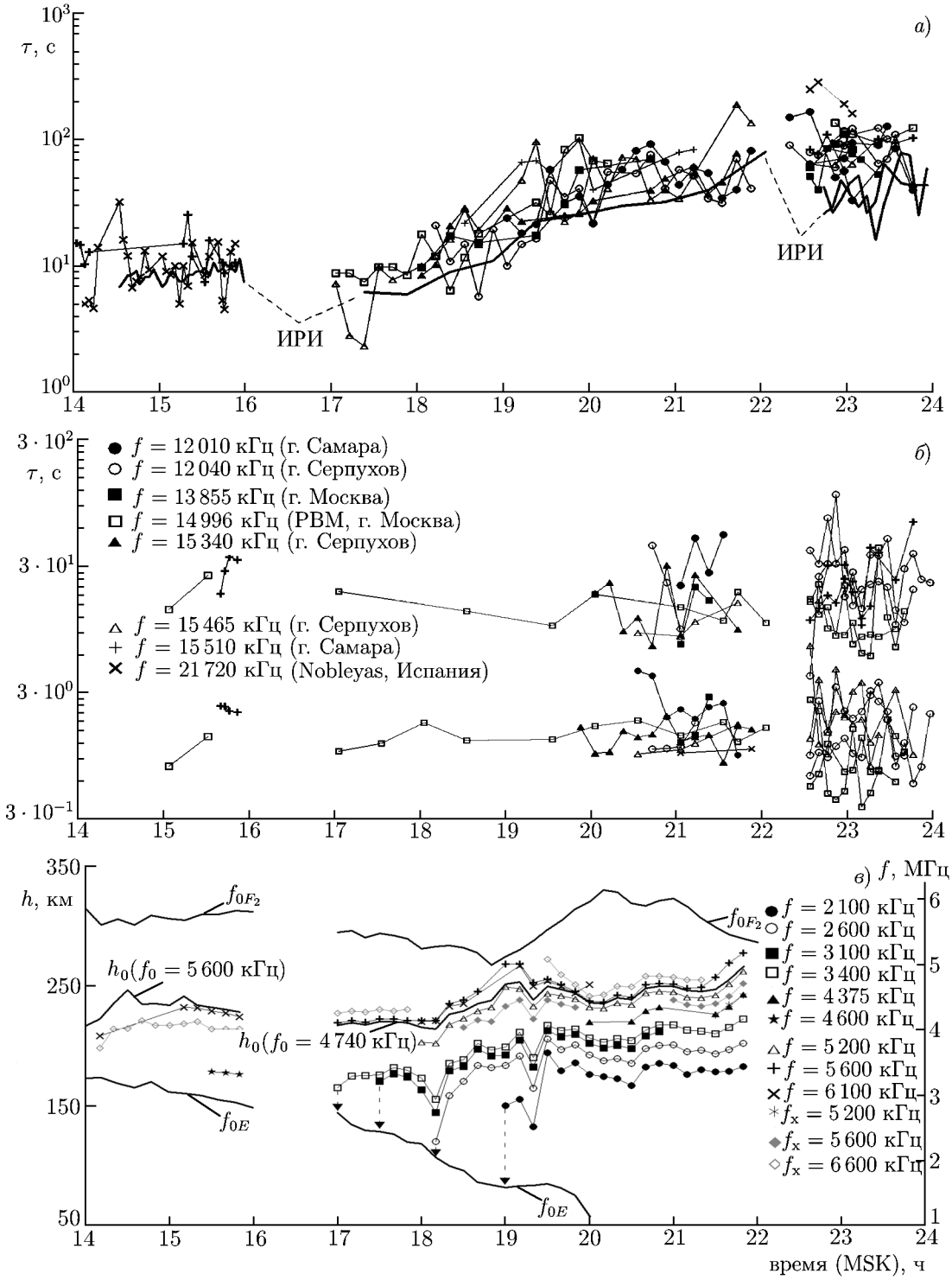

Рис. 5. Зависимость времён релаксации интенсивности рассеянных волн (г. Казань) и диагностического ИРИ от времени суток (*а*), значения частот см. на панели *в*; суточная зависимость времён релаксации интенсивности рассеянных волн (г. Ростов-на-Дону) для двухступенчатого процесса релаксации (*б*); зависимость критических частот, высот отражения волны накачки и рассеянных волн (кривые с символами) над стендом «Сура» от времени суток (*в*). Данные до 22:00 MSK получены 06.09.2010, после 22:30 MSK — 14–15.05.2010

к 23:30 MSK. При этом не наблюдается чётко выраженной зависимости от частоты ракурсно рассеянных волн. Рост времён релаксации неоднородностей с размером $l_\perp \approx \lambda_0$ для ночных условий наблюдений был отмечен и в [7, 8]. Аналогичный рост наблюдается в наших измерениях и для времён релаксации интенсивности диагностического ИРИ (см. рис. 5*а*). Таким образом, в эксперименте установлено соответствие как абсолютных значений характерных времён релаксации декаметровых неоднородностей плазмы и интенсивности диагностического ИРИ, так и изменений их величины при переходе от дневных к ночным наблюдениям.

Отметим близость к экспоненциальной зависимости времён релаксации декаметровых искусственных неоднородностей и интенсивности диагностического ИРИ от времени суток в заходные часы от 18:00 MSK до 22:00 MSK. В самой зависимости не наблюдается какой-либо привязки ко времени прохождения солнечного терминатора по поверхности Земли в 19:30 MSK. В некоторых вечерних и ночных измерениях времена релаксации интенсивности ракурсно рассеянных волн особенно существенно возрастали до 200 с и более для максимальных частот зондирования (5,6÷6,6 МГц), когда высота их рассеяния (как и центра возмущённой области) приближалась к высоте максимума F-слоя. Подобного увеличения не наблюдалось в аналогичных условиях для дневных и предзаходных часов наблюдений.

Приведённые на рис. 5*б* данные показывают, что релаксация неоднородностей с меньшими размерами $l_\perp \approx 7\div15$ м имела двухступенчатый характер с временами $\tau_1 \approx 0{,}4\div4$ с на первой стадии (среднее $\langle\tau_1\rangle \approx 1{,}2\div2{,}2$ с) и $\tau_2 \approx 8\div50$ с на второй стадии ($\langle\tau_2\rangle \approx 15\div30$ с), после уменьшения интенсивности более, чем на 10 дБ. Видно, что для этих пространственных масштабов отсутствует какая-либо выраженная зависимость от времени суток для обеих ступеней релаксации. Ярко выраженная суточная зависимость для времён релаксации неоднородностей с крупными декаметровыми масштабами ($l_\perp \approx 45\div130$ м) и отсутствие таковой для второй ступени релаксации более мелких масштабов ($l_\perp \approx 7\div15$ м) в наших экспериментах, несмотря на близость абсолютных значений характерных времён этих процессов, указывает на различия в механизмах релаксации неоднородностей с такими масштабами. Таким образом, наблюдаемая вторая более длинная стадия релаксации для более мелких искусственных неоднородностей напрямую не может определяться релаксацией неоднородностей бóльших масштабов. Отметим, что для более крупных масштабов двухступенчатой релаксации, как правило, не наблюдалось. Однако последнее может быть связано с меньшим превышением сигнала над шумами (примерно 10÷15 дБ).

Для данных, полученных под Казанью, оценки высоты рассеяния зондирующих сигналов h_{PPB} в возмущённой области, совпадающей с высотой их отражения от ионосферы, можно получить из ионограмм и данных по временам задержки сигнала при возвратно-наклонном зондировании, используя правило вертикальной и наклонной эквивалентности в плоскослоистой ионосфере [29]. Результаты таких расчётов приведены на рис. 5*в*. Представленные на рис. 5*в* данные свидетельствуют о возрастании высотного смещения области рассеяния $\Delta h = h_0 - h_{\mathrm{PPB}}$ от центра возмущённой области (высоты отражения волны накачки) с $|\Delta h| \approx 25\div30$ км днём до $|\Delta h| \approx 100$ км вечером и ночью.

Рост смещения $|\Delta h|$ отвечал появлению рассеяния на всё более низких частотах и меньших высотах, что свидетельствует об увеличении продольных размеров нижней части возмущённой области в вечерние и ночные часы. Оценка степени вытянутости верхней части возмущённой области не могла быть выполнена в полной мере из-за нарушения условий обратного рассеяния на больших высотах для используемых частот ракурсно рассеянных волн. Отметим, что наблюдалась определённая корреляция уменьшения критической частоты E-слоя и появления рассеяния на всё более низких частотах зондирующих сигналов на высотах 150÷160 км (см. рис. 5*в*).

Возрастание вертикального размера области возмущений в вечерних и ночных измерениях по сравнению с дневными отмечалось и в экспериментах с использованием для её диагностики измерений характеристик диагностического ИРИ при зондировании ионосферы на частотах $f_д$, отличных от частоты волны накачки f_0 [17, 19, 21]. При этом, поскольку такое диагностическое ИРИ генерируется на различных высотах возмущённой области, по уменьшению интенсивности излучения с ростом расстройки $|\delta f| = |f_0 - f_д|$ (и соответствующей ей $|\Delta h|$) можно оценивать её вертикальный размер.

Наличие вариаций высот отражения для ракурсно рассеянных волн предполагает и вариации их показателей преломления в плазме, что в соответствии с формулой (1) приводит к вариациям и размеров рассеивающих неоднородностей. На основании данных измерений высот рассеяния (отражения) (см. рис. 5*в*) и высотного профиля электронной концентрации над стендом «Сура», получаемого из ионограмм, был сделан расчёт показателей преломления и размеров рассеивающих неоднородностей для ракурсно рассеянных волн. На рис. 6 представлены зависимости времён первой стадии релаксации искусственных неоднородностей τ от пространственного масштаба неоднородностей $l_\perp$ для предзакатных (дневных) и ночных условий измерений. Данные проведённых измерений свидетельствуют об изменении показателя степенной зависимости $\tau \propto {l_\perp}^\beta$ с $\beta \approx 1$ днём (см. также [4, 6, 11], где приводимые значения β уменьшаются до 0,5) до $\beta \approx 2$ для ночных наблюдений (см. также [30]) в области масштабов $l_\perp \approx 10 \div 50$ м. Для бóльших масштабов $l_\perp > 50$ м наблюдаемые значения для показателя степени β близки к нулю.

Как показано в работах [5, 11, 30, 31], характер релаксации искусственных неоднородностей в ионосфере определяется амбиполярными диффузионными коэффициентами (поперечным $D_{a\perp}$ и продольным $D_{a\parallel}$):

$$D_{a\perp} = k\,(T_e + T_i)\,\nu_e/(m_e\omega_{ce}^2), \qquad D_{a\parallel} = k\,(T_e + T_i)/(\nu_{in} m_i). \tag{4}$$

Здесь k — постоянная Больцмана, T_e и T_i — электронная и ионная температуры, ν_e, ν_{in} и ω_{ce} — частоты соударений электронов и ионов с нейтральными частицами и гирочастота электронов, m_e и m_i — масса электрона и иона соответственно.

Полученные данные о временах релаксации искусственных неоднородностей плазмы (см. рис. 6) позволяют определить значения эффективных коэффициентов поперечной и продольной диффузии в верхней ионосфере. Поперечный коэффициент диффузии связывается с временем релаксации неоднородностей и их поперечным размером следующей формулой [5]:

$$D_\perp = 1/(2\tau\kappa_\perp^2) = l_\perp^2/(8\pi^2\tau). \tag{5}$$

Подставляя в (5) наблюдаемые в эксперименте значения $\tau = 2$ с для $l_\perp = 10$ м, получим значение $D_\perp = 0{,}6$ м^2/с, которое согласуется с результатами, полученными ранее (см. [5]), и соответствует коэффициенту амбиполярной поперечной (электронной) диффузии $D_{a\perp}$ из (4) при стандартных значениях ионосферных параметров, взятых из [32].

При коэффициенте $D_{a\perp} = \text{const}$ имеет место степенна́я зависимость вида $\tau \propto l_\perp^2$ с показателем степени $\beta = 2$. Как показано в ряде работ [5, 6, 11, 31] подобная ситуация имеет место в области метровых размеров неоднородностей для $l_\perp^* \le 10$ м, а в наших ночных наблюдениях реализуется вплоть до масштабов $l_\perp^* \approx 50$ м.

Граничный поперечный масштаб $l_\perp^*$, при котором показателя степенной зависимости $\tau \propto l_\perp^\beta$ изменяется с $\beta = 2$ на $\beta = 0 \div 0{,}5$, характеризует смену режима диффузии с поперечного на продольный. Это значит, что для масштабов $l_\perp > l_\perp^*$, при которых наблюдается слабая зависимость времени релаксации τ от поперечного масштаба искусственных неоднородностей, имеет место продольная диффузия с коэффициентом [5]:

$$D_\parallel = 1/(2\tau\kappa_\parallel^2) = l_\parallel^2/(8\tau), \tag{6}$$

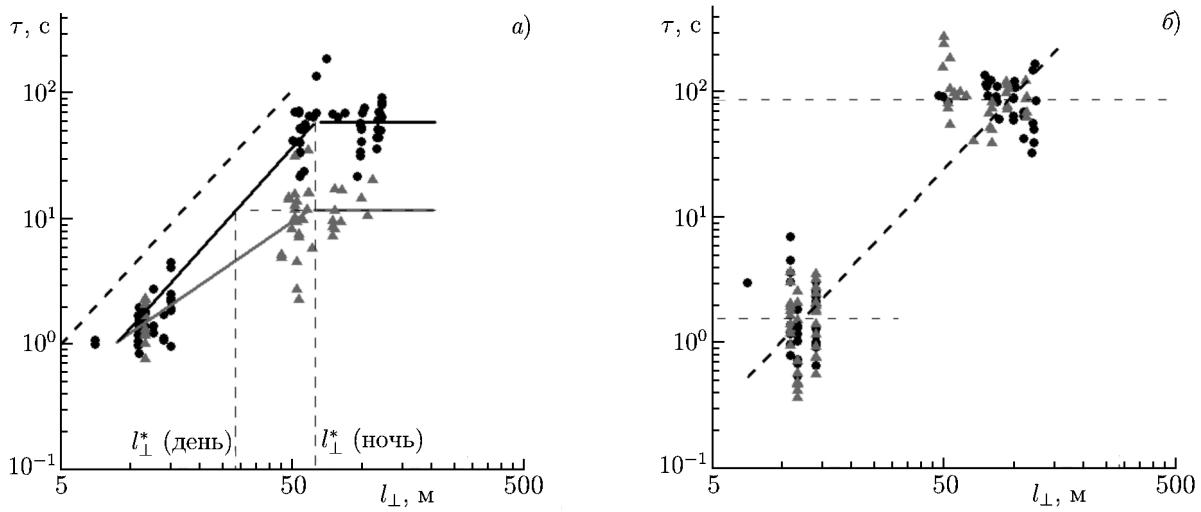

Рис. 6. Зависимость времён релаксации интенсивности рассеянных волн от поперечного масштаба неоднородностей для 06.09.2010, 14:00–22:00 MSK (*а*), 22:30–24:00 MSK 14.05.2010 и 15.05.2010 (*б*, чёрные и серые символы, соответственно, для разных дней). Данные дневных измерений до 18:30 MSK приведены на панели *а* с помощью серых символов, данные вечерних и ночных измерений до 22:00 MSK — чёрными символами. Наклон пунктирной линии соответствует квадратичной зависимости $\tau(l_\perp)$

величину которого можно определить из (4) и [32] как $D_\parallel = (0{,}3 \div 1) \cdot 10^6$ м^2/с. При этом степень вытянутости возмущений в направлении магнитного поля для F-слоя ионосферы должна удовлетворять условию [30]:

$$\epsilon = \kappa_\perp/\kappa_\parallel = \pi l_{0\parallel}/l_\perp^* \le (D_{\mathrm{a}\parallel}/D_{\mathrm{a}\perp})^{1/2} = [\omega_{\mathrm{ce}}\omega_{\mathrm{ci}}/(\nu_{\mathrm{e}}\nu_{\mathrm{in}})]^{1/2} \sim 10^3 \quad \text{или} \quad l_{0\parallel} \le 10^3 l_\perp^*/\pi. \qquad (7)$$

Поскольку продольный масштаб неоднородностей $l_\parallel$, как правило, неизвестен, знание $l_\perp^*$ (граничного поперечного масштаба, при котором происходит смена режима диффузии), позволяет оценить $l_{0\parallel}$ из (7).

Согласно данным, представленным на рис. 6, в предположении квадратичной зависимости $\tau(l_\perp)$ в области поперечной диффузии для дневных измерений граничный размер неоднородностей лежит в области масштабов $l_\perp^* \approx 20 \div 30$ м, для ночных измерений $l_\perp^* \approx 50 \div 60$ м. Тогда отвечающий этим значениям масштаб $l_{0\parallel}$, согласно (7), составляет 5÷8 и 16÷22 км соответственно, т. е. должен возрастать в 2÷3 раза при переходе от дневных к ночным измерениям.

Сделанные предположения и оценки подтверждаются данными проведённых измерений. Так, наблюдаемая слабая изменчивость суточных значений времени $\tau \propto l_\perp^2/D_{\mathrm{a}\perp}$ для масштабов $l_\perp \approx 7 \div 15$ м может определяться слабыми вариациями коэффициента $D_{\mathrm{a}\perp}$ для этих неоднородностей в данной серии измерений. С другой стороны, в ряде экспериментов [5, 6, 31] отмечалось увеличение до 2 раз времён релаксации неоднородностей с размером $l_\perp \le 10$ м в ночные часы наблюдений, причина которого в условиях уменьшения температуры T_{e} и преобладания электронно-ионных столкновений с частотой $\nu_{\mathrm{ei}} \propto T_{\mathrm{e}}^{-3/2}$ (см. (4) и [32]) остаётся неясной.

Для масштабов $l_\perp \approx 45 \div 130$ м релаксация определяется уже продольной диффузией ($\tau \propto \propto l_\parallel^2/D_{\mathrm{a}\parallel}$). В условиях достаточно слабой изменчивости коэффициента $D_{\mathrm{a}\parallel}$ от времени суток вечернее замедление релаксации наиболее крупных декаметровых неоднородностей до 5÷10 раз в этом случае можно связать с ростом их продольного размера $l_\parallel$ в 2–3 раза, что наблюдается в эксперименте (см. рис. 5*в*). В ходе измерений высота центральной части возмущённой области изменялась от 220 до 260 км. Чтобы скомпенсировать возможное уменьшение времён τ, связан-

ное с ростом коэффициента $D_{a\|}$ при уменьшении ν_{in} с высотой (см. (6) и [32]), наблюдавшееся в экспериментах [33], увеличение продольного масштаба должно быть ещё более значительным.

Слабая зависимость (или её отсутствие) времён релаксации τ от поперечного масштаба $l_\perp$ для больши́х масштабов с $l_\perp > l_\perp^*$ определяется, по-видимому, слабой для них зависимостью $l_\|(l_\perp)$. Аналогичные выводы были сделаны ранее для объяснения результатов исследований динамики неоднородностей, полученных в экспериментах по радиопросвечиванию возмущённой области ионосферы с геостационарного спутника [30]. Для ночных наблюдений близкие результаты были получены и в целом для зависимости $\tau(l_\perp)$ в области декаметровых размеров неоднородностей при измерениях разными методами — ракурсного рассеяния и радиопросвечивания [30].

В нашем случае необходимо отметить следующее. С уменьшением зондирующей частоты от 4 300 до 2 000 кГц рассеяние на более крупных декаметровых неоднородностях от $l_\perp \approx 60$ м до $l_\perp \approx 125$ м происходило на более низких высотах, удаляясь от центра возмущённой области. Разность высот зондирования и центра возмущённой области, как отмечалось, могла достигать 80÷100 км. Уменьшение высоты должно приводить к уменьшению параметров $T_e(h)$ и $\nu_{in}(h)$ [32] и, далее, к уменьшению коэффициенты $D_{a\|}$ (см. (4)) и росту времени τ (см. (6)) для более низких частот и наиболее крупных неоднородностей. Этого в эксперименте не наблюдается, следовательно, опять должен сработать механизм компенсации, который может быть связан теперь с уменьшением длины $l_\|$ для данных частот зондирующих волн и соответствующих им масштабов рассеяния на нижнем краю возмущённой области.

Наряду с анализом релаксации интенсивности ракурсно рассеянных сигналов была проведена обработка данных с целью определить характерные времена роста интенсивности сигналов для всего массива измерений. Результаты этой обработки в зависимости от частоты сигналов, времени суток и масштабов рассеяния представлены на рис. 7. Отмечается достаточно большой разброс времён роста интенсивности ракурсно рассеянных сигналов и отсутствие выраженной суточной зависимости. Сложность анализа процессов рассеяния на стадии генерации неоднородностей, в отличие от стадии их релаксации, заключается в появлении дополнительных факторов, влияющих на конечный результат. Такими факторами являются зависимости характерных времён (инкрементов) развития от эффективной мощности нагревной волны, проходящей в возмущённую область через нижележащие слои ионосферы, а также от процессов пространственного переноса возмущений из области их эффективной генерации вблизи уровней отражения и верхнегибридного резонанса волны накачки на периферию возмущённой области.

В дневных измерениях начало роста интенсивности рассеянного сигнала задерживалось до 10÷20 с на частотах, уровни рассеяния для которых были наиболее удалены от центра возмущённой области. Однако к вечерним и ночным измерениям эти задержки, как правило, практически исчезали даже для самых низких используемых частот, уровни рассеяния для которых были наиболее удалены от области плазменных резонансов волны накачки. Наблюдаемая зависимость времён роста интенсивности рассеянных волн от размера неоднородностей в области исследуемых масштабов $\tau_г \propto {l_\perp}^\gamma$ имеет показатель степени $\gamma \approx 1$, что превышает ранее полученные в [6, 11, 30] значения $\gamma \approx 0{,}4 \div 0{,}5$.

На основании проведённых исследований из сопоставления динамики ИРИ и мелкомасштабных искусственных неоднородностей плазмы можно, как и в [11, 18, 19], сделать вывод об интегральном влиянии спектра неоднородностей на эволюцию искусственного радиоизлучения. Характерным временам развития временно́го максимума интенсивности ИРИ отвечают времена развития метровых неоднородностей. Времена развития декаметровых неоднородностей соответствуют временам достижения стационарного уровня интенсивности излучения после этого максимума (при развитии overshoot-эффекта как проявления аномального ослабления излучения).

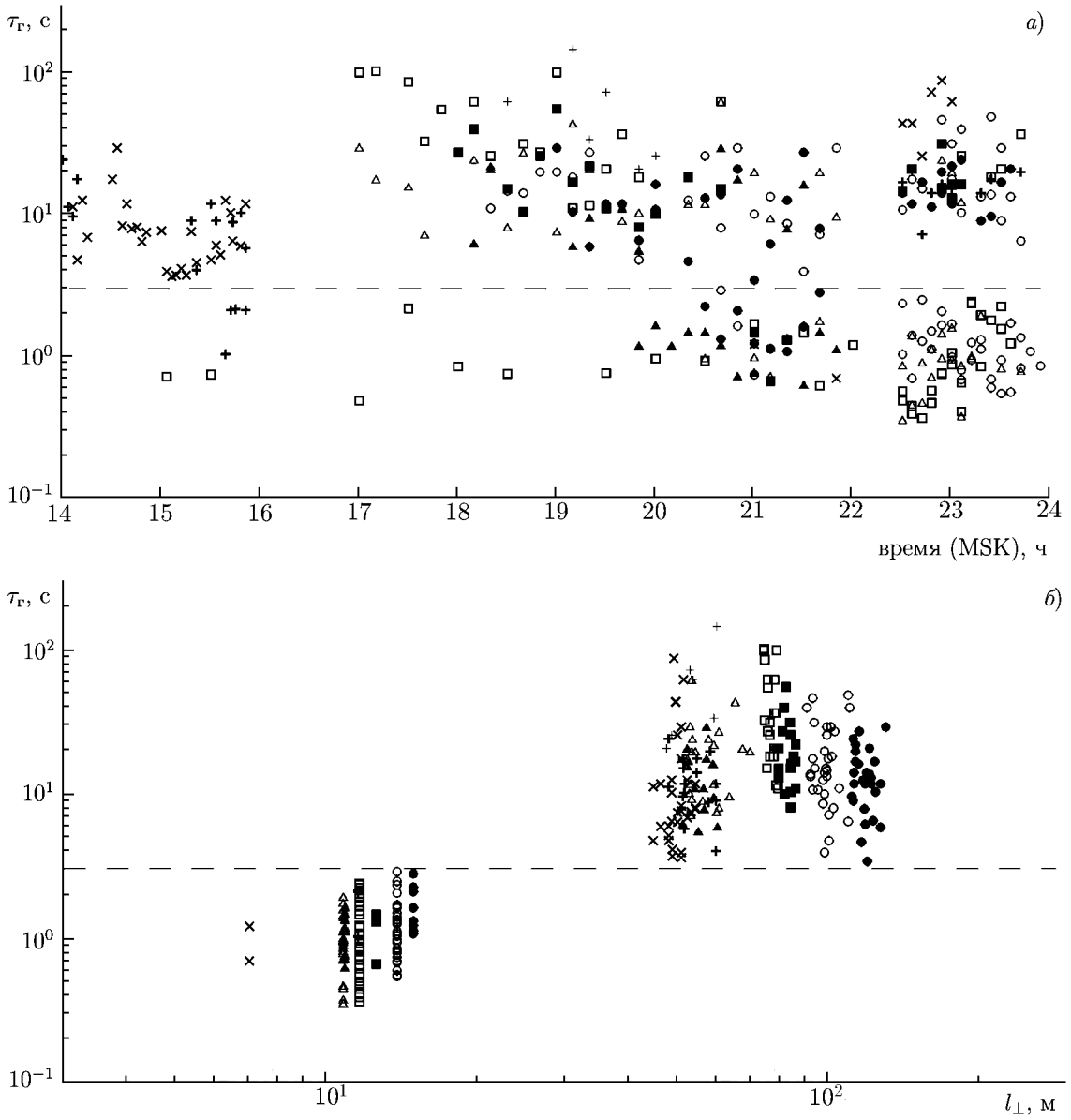

Рис. 7. Зависимость времён роста интенсивности рассеянных волн $\tau_г$ от времени суток для различных частот зондирования (*а*) и от поперечного масштаба неоднородностей (*б*) для 06.09.2010 и 14–15.05.2010. Символы отвечают частотам, определённым на рис. 5. Пунктирная линия, соответствующая $\tau_г = 3$ с, разделяет данные, полученные вблизи Казани ($\tau_г > 3$ с, символы отвечают частотам на рис. 5*в*) и в Ростове-на-Дону ($\tau_г < 3$ с, символы отвечают частотам на рис. 5*б*)

При выключении нагрева на стадии распада неоднородностей, характерные времена релаксации неоднородностей с метровыми масштабами отвечают быстрой релаксации аномального ослабления и временно́му росту интенсивности уже диагностического ИРИ (обратный overshoot-эффект), последующая длительная релаксация излучения соответствует релаксации декаметровых неоднородностей. Последний вывод подтверждает и обнаруженное соответствие значений времён релаксации и их суточных вариаций для декаметровых неоднородностей и интенсивности диагностического ИРИ. Процессы развития и релаксации аномального ослабления волны накачки, исследовавшиеся в [25] и определяемые интегральным влиянием спектра искусственных неоднород-

ностей [23], в сопоставлении с динамикой диагностического ИРИ наблюдались в экспериментах, представленных в [34], и показали высокую степень корреляции.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе комплексных экспериментов по дистанционной диагностике параметров ионосферы, возмущённой мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура», проведены исследования области искусственной ионосферной турбулентности с помощью коротковолновой локации в широкой полосе частот от 2 до 22 МГц, при регистрации ракурсно рассеянных сигналов в трёх различных пунктах приёма — вблизи Казани, в Троицке и Ростове-на-Дону. Специальные временны́е режимы излучения передатчиков стенда, сочетающие чередование квазинепрерывного нагрева и диагностических импульсов с большой скважностью излучения, позволили одновременно исследовать эволюцию плазменной турбулентности с помощью измерений характеристик ИРИ непосредственно под возмущённой областью.

На основе анализа динамических характеристик ракурсно рассеянных сигналов обнаружена слабая зависимость характерных времён для обеих стадий релаксации искусственных неоднородностей с пространственными масштабами 7 м $< l_\perp <$ 15 м от времени суток и возрастание характерных времён релаксации в 5÷10 раз для неоднородностей с масштабами 45 м $< l_\perp <$ $<$ 125 м при переходе от дневных к ночным измерениям. Замедление релаксации декаметровых неоднородностей связывается с увеличением их продольных размеров в 2÷3 раза при переходе от дня к ночи. Перелом в степенно́й зависимости времени релаксации от поперечного масштаба рассеивающих неоднородностей $\tau \propto l_\perp^\beta$ с изменением показателя степени с $\beta \approx 1 \div 2$ на $\beta \approx 0$, связываемый со сменой режима диффузии с поперечного на продольный, происходит на граничных масштабах $l_\perp^* \approx 15 \div 30$ м для дневных и $l_\perp^* \approx 50 \div 60$ м для ночных наблюдений. Если ранее определённая в [6, 11, 31] величина $l_\perp^* \approx 7 \div 10$ м близка к её дневным значениям $l_\perp^*$, полученным в данной работе, то уменьшение граничного масштаба до $l_\perp^* \approx 3$ м в ночных измерениях, приведённое в [31], вызывает теперь сомнения.

Анализ результатов выполненных измерений показал, что выявление высотной зависимости времён релаксации при рассеянии зондирующих радиоволн на различных высотах возмущённой области требует проведения более тщательных расчётов траекторий их распространения с учётом рефракции. На данном этапе исследований не удалось пока однозначно определить степень влияния вариаций высоты рассеяния на характер исследуемых зависимостей $\tau(l_\perp, l_\parallel)$.

В проведённых впервые одновременных измерениях характеристик неоднородностей с масштабами $l_\perp \sim \lambda_0$ и диагностического ИРИ обнаружено совпадение абсолютных значений и корреляция суточных вариаций их времён релаксации. Здесь следует отметить, что характерные времена релаксации τ интенсивности диагностического ИРИ, с учётом зависимости $\tau(l_\perp)$, наиболее близки к временам релаксации неоднородностей с $l_\perp \le 40 \div 50$ м, рассеивающих радиоволны на частотах $f \approx f_0$ в центре возмущённой области ионосферы, где в области плазменного и верхнегибридного резонансов волны накачки и происходит генерация искусственного радиоизлучения [23]. Это позволяет использовать данные измерений ИРИ для оценки динамических характеристик мелкомасштабных искусственных неоднородностей, для коррекции динамической модели их пространственного спектра [11], а также для проведения на основе модифицированной модели более адекватных численных расчётов эволюции искусственного радиоизлучения, подобных выполненным в [23].

Дополнительно к измерениям характеристик ракурсно рассеянных волн и ИРИ в экспериментах 20–24.09.2010 проведены исследования эволюции крупномасштабных ($l_\perp > 200 \div 500$ м) возмущений высотного профиля электронной концентрации в области плазменных резонансов волны

накачки и пространственного поля скоростей плазмы с помощью фазовых измерений и корреляционного анализа широкополосных пробных сигналов при их разнесённом приёме на стенде «Сура» [35], позволяющих восстанавливать более полную картину динамики пространственной структуры области искусственной плазменной турбулентности в ионосфере. В последней серии измерений в июне и августе 2011 года исследованы динамические характеристики ИРИ и ракурсно рассеянных волн в широком диапазоне частот от 2 до 22 МГц при возбуждении плазменной турбулентности в области четвёртой гармоники гирочастоты электронов $4f_{ce} \approx 5{,}4$ МГц. Анализу полученных данных будут посвящены следующие работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11–02–00125 и 12–02–00513) и Министерства образования и науки РФ (гос. контракт 16.518.11.7066).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fialer P. A. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 923.
2. Barry G. H. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 1 025.
3. Rao P. B., Thome G. D. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 987.
4. Herberg A., Deblom H., Thide B., et al. // Radio Sci. 1983. V. 18, No. 6. P. 840.
5. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Митяков Н. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
6. Беликович В. В., Ерухимов Л. М., Зюзин В. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31, № 3. С. 251.
7. Бахметьева Н. В., Гончаров Н. П., Игнатьев Ю. А. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 5. С. 799.
8. Бахметьева Н. В., Игнатьев Ю. А., Дмитриев С. А., Шавин П. Б. // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32, № 3. С. 180.
9. Насыров А. М. Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1991.
10. Авдеев В. Б., Белей В. С., Беленов А. Ф. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 4. С. 479.
11. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Metelev S. A., Sergeev E. N. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 1997. V. 59. P. 2 317.
12. Акчурин А. Д., Ким В. Ю., Панченко В. А. и др. // Труды XXII Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн», Ростов-на-Дону, п. Лоо, 22–26 сентября 2008. Т. 2. С. 175.
13. Зыков Е. Ю., Сергеев Е. Н., Акчурин А. Д., Насыров И. А. // Труды XXIII Всерос. науч. конф. по распространению радиоволн, Йошкар-Ола, 2011. Т. 2. С. 235.
14. Бойко Г. Н., Ерухимов Л. М., Зюзин В. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 4. С. 395.
15. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Разумов Д. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31, № 11. С. 1 301.
16. Фролов В. Л., Бойко Г. Н., Метелёв С. А., Сергеев Е. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 4. С. 909.
17. Сергеев Е. Н., Фролов В. Л., Бойко Г. Н., Комраков Г. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41, № 3. С. 313.
18. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 7. С. 619.

19. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 8. С. 810.
20. Leyser T. B. // Space Sci. Rev. 2001. V. 98, No. 3–4. P. 223.
21. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Котов П. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 649.
22. Norin L., Grach S. M., Leyser T. B., et al. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. no. A09314.
23. Grach S. M., Shvarts M. M., Sergeev E. N., Frolov V. L. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 1998. V. 60, No. 12. P. 1 233.
24. Фролов В. Л., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 51, № 4. С. 273.
25. Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31, № 10. С. 1 164.
26. Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Корниенко В. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 678.
27. Вертоградов Г. Г., Мятежников Ю. П., Урядов В. П., Розанов С. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 51, № 1. С. 15.
28. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т. 15, № 5. С. 22.
29. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 504 с.
30. Мясников Е. Н., Муравьёва Н. В., Сергеев Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44, № 11. С. 903.
31. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Митяков Н. А. и др. // Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 7.
32. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. С. 273.
33. Блаунштейн Н. Ш., Ерухимов Л. М., Урядов В. П. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1988. Т. 28, № 5. С. 693.
34. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Шиндин А. В. // Труды XXIII Всерос. науч. конф. по распространению радиоволн, Йошкар-Ола. 2011. Т. 2. С. 265.
35. Shindin A. V., Sergeev E. N., Grach S. M. // Radio Sci. 2012. (в печати).

Поступила в редакцию 26 октября 2011 г.; принята в печать 12 января 2012 г.

RESULTS OF INTEGRATED STUDIED OF THE PERTURBED IONOSPHERE REGION USING SHORT-WAVE RANGING IN A WIDE FREQUENCY BAND AND ARTIFICIAL RF RADIATION OF THE IONOSPHERE

E. N. Sergeev, E. Yu. Zykov, A. D. Akchurin, I. A. Nasyrov, G. G. Vertogradov, V. G. Vertogradov, V. Yu. Kim, V. P. Polimatidi, and S. M. Grach

We present the results of studying simultaneously the dynamics of artificial plasma irregularities in the range of decameter scales $l_\perp \approx 7$–125 m being perpendicular to the magnetic field and diagnostic artificial RF radiation of the ionosphere, which were obtained during heating experiments on the "Sura" facility and several remote points where aspect-scattered signals were received. The daily dependence of the times of evolution and relaxation of the irregularities and the diagnostic RF radiation of the ionosphere are analyzed and compared.