

УДК 533.951+537.868

ДИАГНОСТИКА ГЕНЕРАЦИИ, РЕЛАКСАЦИИ И ПЕРЕНОСА ИСКУССТВЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ МОЩНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Е. Н. Сергеев^{* 1,2}, *С. М. Грач*², *В. Л. Фролов*^{1,3}, *А. В. Шиндин*²

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

³ Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

Обсуждаются методика измерений и возможности использования мощных коротких импульсов мощного радиоизлучения для диагностики свойств высокочастотной и низкочастотной ионосферной плазменной турбулентности. Представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных на нагревном стенде «Сура».

ВВЕДЕНИЕ

Использование коротких импульсов мощного радиоизлучения для диагностики ионосферной плазменной турбулентности позволяет минимизировать влияние последствия мощной радиоволны на исследуемые процессы, включая генерацию искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) непосредственно на частоте воздействия и на сдвинутой относительно частоты волны накачки диагностической частоте. С другой стороны, использование в качестве диагностической волны непрерывного маломощного излучения обеспечивает максимальное временное разрешение измерений. В работе представлены результаты поиска и исследований оптимальных режимов воздействия на ионосферную плазму и её зондирования в рамках развития метода комплексной диагностики возмущённой области ионосферы над нагревным стендом «Сура» с помощью сигналов ИРИ, связанных с непрерывной волной накачки и диагностическим импульсным излучением. Данный метод подробно описан в работах [1–3].

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ И РЕЛАКСАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСОВ С ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 200 мкс

1.1. Методика измерений

В экспериментах, проведённых 12–15 марта 2010 года, были продолжены исследования по импульсной диагностике искусственной плазменной турбулентности с помощью ИРИ. В условиях роста солнечной активности и критических частот F -слоя впервые, начиная с 2006 года, удалось использовать для нагрева плазмы не только частоту $f_0 = 4740$ кГц, но и более высокую частоту $f_0 = 5600$ кГц, в области которой наблюдается максимум стационарной спектральной интенсивности ИРИ [4]. Измерения проводились в дневное время суток с 14:00 до 17:00 MSK с использованием трёх (частота излучения $f_0 = 4740$ кГц, эффективная мощность излучения $P = 120$ МВт) или двух ($f_0 = 5600$ кГц, $P = 60$ МВт) передатчиков стенда «Сура» для излучения волны накачки с обыкновенной поляризацией в зенит. Используемая временная схема излучения должна

* esergeev@nirfi.sci-nnov.ru

была обеспечить мониторинг эволюции как низкочастотной, так и высокочастотной ионосферных турбулентностей, определяемых динамикой искусственных неоднородностей концентрации плазмы и высокочастотных плазменных волн соответственно. Для нагрева применялся режим квазинепрерывного воздействия импульсами с длительностью $\tau_{\text{и}} = 72$ мс и периодом $T_{\text{и}} = 100$ мс в течение 30 с. Для зондирования использовались короткие импульсы с $\tau_{\text{и}} = 200$ мкс и $T_{\text{и}} = 20$ мс в течение всего 90-секундного цикла воздействия, при этом во время нагрева диагностические импульсы также излучались раз в 100 мс за 8 мс перед каждым импульсом нагрева. Подобная схема излучения позволила исследовать динамику диагностического ИРИ как на стадии его развития при нагреве, так и на стадии релаксации низкочастотной турбулентности после выключения нагрева. Поскольку природа генерации ИРИ имеет шумовой характер, необходимо было провести как можно больше идентичных циклов воздействия для последующего усреднения их результатов.

1.2. Анализ данных измерений и полученные результаты

Для каждой частоты волны накачки было проведено по сорок полных 90-секундных циклов нагрева и зондирования, из которых более тридцати оказались пригодными для процесса усреднения. Это позволило при спектральной обработке сигнала отказаться от текущего усреднения по последовательным диагностическим импульсам и перейти к усреднению по ансамблю, обеспечив тем самым максимальное временное разрешение 20 мс, определяемое минимальным периодом повторения диагностических импульсов. На рис. 1 представлены пять усреднённых по 30-ти циклам осциллограмм принимаемого диагностического сигнала до нагрева (время относительно начала нагрева $-0,02$ с, *a*), во время квазинепрерывного нагрева (1 с, *б* и $t = 29$ с, *в*) и после нагрева (40 с, *г* и $t = 55$ с, *д*). Сигнал зарегистрирован в полосе 200 кГц с временным разрешением 4 мкс и позволяет определить следующее.

Момент времени 0 мс на оси абсцисс соответствует приходу переднего фронта импульса земной волны на приёмный пункт, находящийся примерно в 1 км от передатчика. По сути сигнал земной волны является временным и амплитудным маркером, позволяющим определять временные задержки до последующих компонент сигнала, контролировать уровень мощности посылаемого в ионосферу излучения и отслеживать его изменения по техническим причинам.

Второй большой всплеск сигнала на временах около 2 мс соответствует приходу сигнала первого отражения волны накачки от *F*-слоя ионосферы. Следующие за ним кратные отражения монотонно уменьшаются по амплитуде, что связано со сферической расходимостью и поглощением энергии сигнала в *D*- и *E*-слоях ионосферы. Величина этого поглощения оценивается из соотношения амплитуд сигналов первого (A_1) и второго (A_2) отражения как $G = 2A_2/A_1 \approx 3,5$. Изменение величины $A_1(t)$ во время и после нагрева несёт информацию о динамике эффекта аномального ослабления, связанного с трансформацией энергии волны накачки, пробных волн и ИРИ в плазменные волны.

Сигналы с задержками меньше 2 мс вызваны процессами резонансного рассеяния на искусственных периодических неоднородностях *E*- и *F*-областей [5]. Их интенсивность максимальна в первую секунду квазинепрерывного нагрева, далее уменьшается к концу нагрева и резко падает при переходе в режим диагностического зондирования. Для того, чтобы выделить рассеяние на неоднородностях *F*-слоя, на рис. 1б, в сером цвете показана осциллограмма сигнала первого отражения до нагрева плазмы в отсутствие искусственных неоднородностей. Анализ динамики рассеянного сигнала в данной области временных задержек (0÷2 мс) позволяет осуществлять диагностику возмущённой области методом резонансного рассеяния на искусственных периодических неоднородностях, когда частота нагрева и зондирования совпадают. Подобных исследований

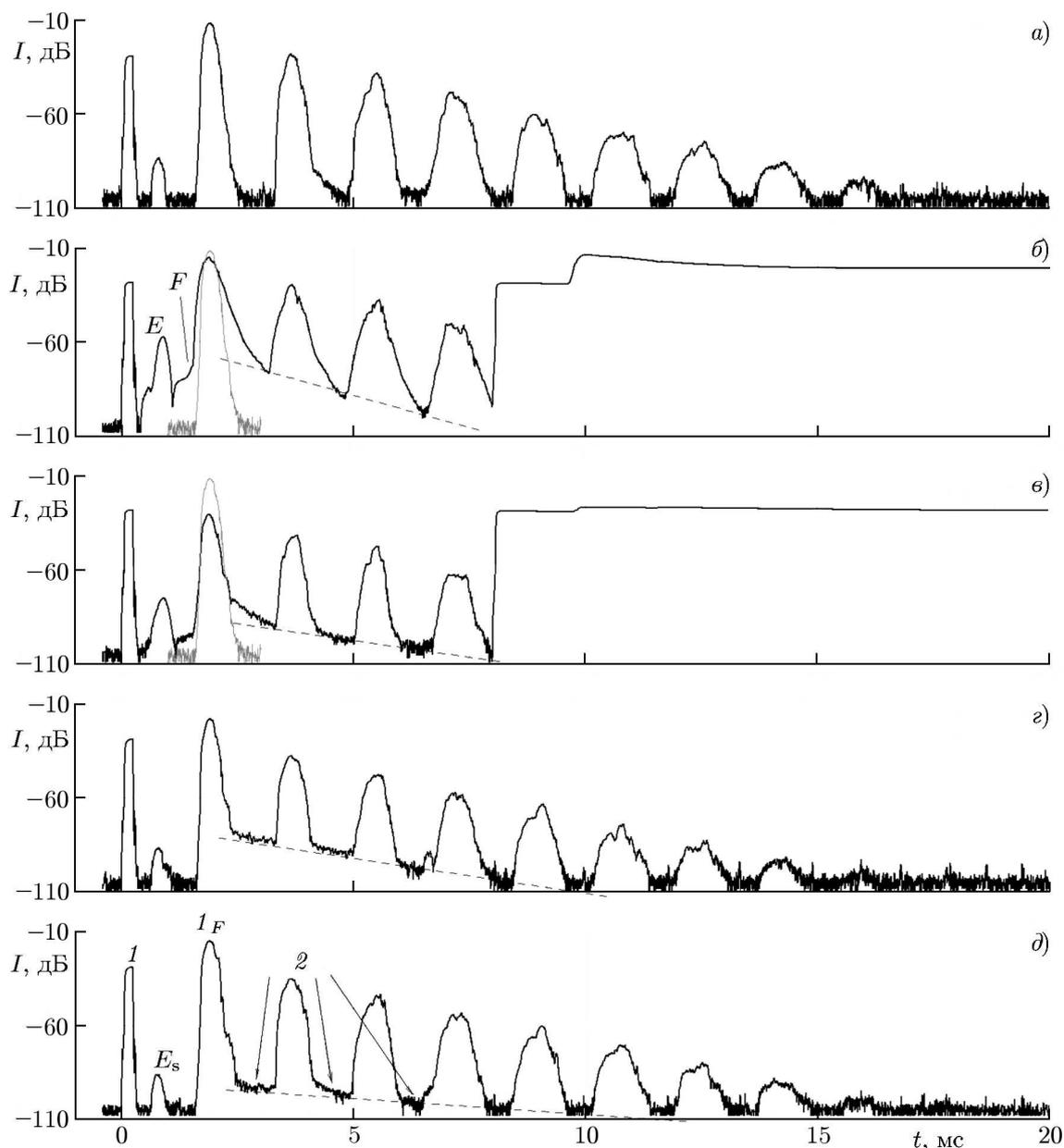


Рис. 1. Пример эволюции интенсивности I импульсного сигнала для разных стадий воздействия на ионосферу 14:00÷15:00 MSK 15 марта 2010 года, частота нагрева $f_0 = 5600$ кГц. Проведено усреднение по тридцати последовательным циклам. На панелях б и в при $t = 8$ мс виден переход к импульсу нагрева с длительностью 72 мс. На панели б также отмечены рассеяние от E -слоя (E) и рассеяние от F -слоя (F), вызванные нагревом. На панели д отмечены сигнал земной волны (1), отражение от спорадического слоя E (E_s), первое отражение от F -слоя (1_F) и ИРИ (2)

для волны накачки с обыкновенной поляризацией выполнено крайне мало, поскольку в основном используется излучение с необыкновенной поляризацией. Как правило, использование непрерывного нагрева вместо квазинепрерывного режима не давало информации о характеристиках развития неоднородностей.

Во время нагрева и при переходе в режим диагностического зондирования в условиях развития и релаксации низкочастотной ионосферной турбулентности на временах каждого первого

отражения диагностического импульса с длительностью 200 мкс происходит практически безынерционное развитие сигнала искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ). Этот сигнал удаётся выделить между кратными сигналами отражения зондирующей волны на стадии релаксации ИРИ по окончании импульса. Более детальные исследования генерации излучения в зависимости от длительности импульса показали, что во время нагрева генерация ИРИ практически переставала наблюдаться для длительностей импульсов $\tau_{\text{и}} \leq 50$ мкс для стенда «Сура» и для $\tau_{\text{и}} \leq 20$ мкс для более мощного стенда HAARP (Аляска). После генерации с окончанием диагностического импульса (через 200 мкс) сигнал ИРИ релаксирует с характерными временами $\tau_{\text{р}}$ (время спада интенсивности в e , т. е. на 4,34 дБ), близкими к временам затухания высокочастотных верхнегибридных плазменных волн [1]. Тогда сигнал ИРИ становится видимым на осциллограммах, поскольку более не экранируется мощным импульсом волны накачки. Времена релаксации ИРИ $\tau_{\text{р}} = \gamma^{-1}$ определяются частотой соударений электронов в ионосфере ν_e и процессами бесстолкновительного затухания плазменных волн: $\gamma = \nu_e + \nu$. На рис. 1 темп спада интенсивности излучения (при наличии сигнала) показан пунктирными линиями. Видно, что при переходе от нагрева к зондированию времена $\tau_{\text{р}}$ монотонно увеличиваются от $\tau_{\text{р}} = 0,6$ мс до $\tau_{\text{р}} = 2,1$ мс, т. е. более чем в 3 раза.

На рис. 2 приведены спектрограммы для диагностического ИРИ при воздействии на ионосферную плазму (зазеркального сигнала ИРИ на стадии его релаксации после выключения диагностического импульса), результаты обработки динамики зеркально отражённого от ионосферы импульсного сигнала волны накачки, рассеянного на неоднородностях на высотах E -области ионосферы сигнала и нескольких различных спектральных компонент ИРИ для частот $f_0 = 4740$ кГц и $f_0 = 5600$ кГц. Временные вариации интенсивностей сигналов связываются здесь с эволюцией низкочастотной турбулентности плазмы на различных высотах в E - и F -областях ионосферы для 90-секундного цикла воздействия (развитием турбулентности в течение 30 с нагрева и релаксацией в течение последующего 60-секундного зондирования).

Для построения спектрограмм (последовательности из 900 спектров ИРИ с частотным разрешением 1 кГц и временным разрешением 100 мс) бралась временная выборка данных между первым и вторым отражением для каждого диагностического импульсного сигнала в цикле воздействия, где наблюдалось ИРИ с максимальной амплитудой, а затем проводилось усреднение по ансамблю из 30-ти циклов измерений. Из рис. 2 видно, что спектрограммы ИРИ для $f_0 = 4740$ кГц и $f_0 = 5600$ кГц качественно подобны. Более сильный overshoot-эффект (подавление ИРИ после его роста при нагреве [7]) наблюдается вблизи более низкой частоты волны накачки, как отмечалось в работе [4].

Аналогичная обработка была проведена для сигнала первого отражения зондирующей волны, сигнала, рассеянного от неоднородностей E -области, и сигнала ИРИ на различных отстройках $\Delta f = f_{\text{ИРИ}} - f_0$. На рис. 2в, з приведены осциллограммы интенсивностей зондирующего сигнала волны накачки. Хорошо видно, что сигнал во время квазинепрерывного нагрева испытывает аномальное ослабление около 24 дБ для $f_0 = 4740$ кГц и около 18 дБ для $f_0 = 5600$ кГц. Подобную разницу значений естественно связать с разницей в используемых мощностях нагрева (120 и 60 МВт) для разных частот волны накачки. В развитии эффекта аномального ослабления можно выделить две стадии: быстрая с характерными временами $\tau_{\text{АО1}} \approx 0,9 \div 1,7$ с, когда наблюдается уменьшение интенсивности волны на 15 \div 20 дБ, и более медленная с $\tau_{\text{АО2}} \approx 10 \div 30$ с уменьшением интенсивности примерно на 5 дБ. Соответственно, величина подавления ИРИ для одинаковых отстроек — так называемый overshoot-эффект (см. рис. 2ж, з) — также больше в измерениях для меньшей из частот волны накачки (до 40 и 23 дБ для разных частот волны накачки и $\Delta f = -2$ кГц). Временная динамика развития эффектов аномального ослабления диагностического сигнала и подавления ИРИ после включения нагрева одинакова.

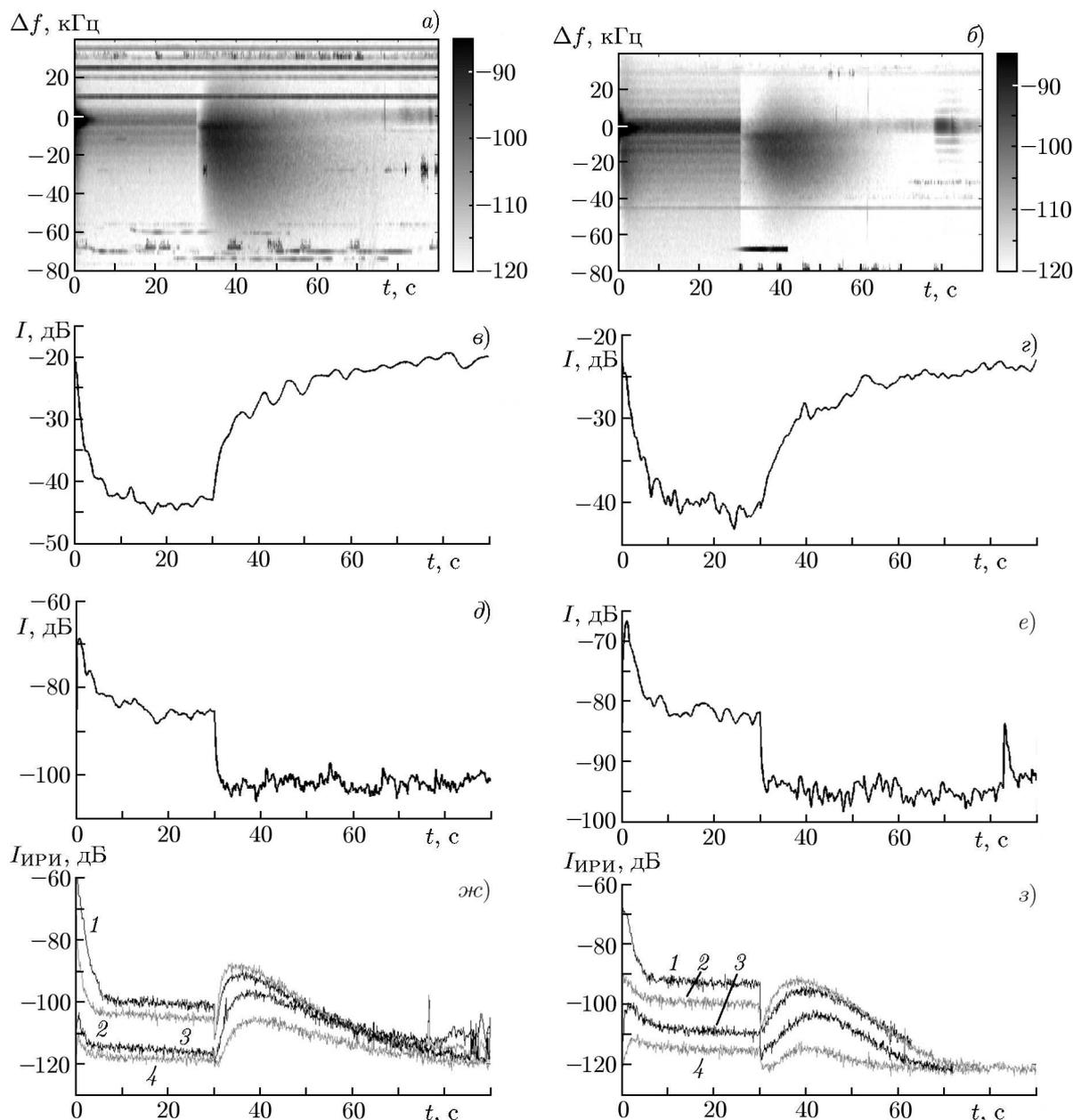


Рис. 2. Спектрограммы сигналов диагностического ИРИ, усреднённые по 30–90-секундным циклам воздействия (*a*, *б*); осциллограммы интенсивности зондирующей волны на частоте f_0 (*в*, *з*), интенсивности рассеянного сигнала от искусственных периодических неоднородностей E -области (*д*, *е*) и интенсивности диагностического ИРИ на различных отстройках Δf от частоты f_0 (*жс*, *з*). На панелях *a*, *в*, *д*, *жс* представлены данные за 15:50÷16:50 MSK 12 марта 2010 года ($f_0 = 4740$ кГц, $P = 120$ МВт), на панелях *б*, *з*, *е*, *з* — 14:00÷15:00 MSK 15 марта 2010 года ($f_0 = 5600$ кГц, $P = 60$ МВт). Кривые 1 на панелях *жс*, *з* соответствуют отстройкам $\Delta f = -2$ кГц, кривые 2 — $\Delta f = -6$ кГц, кривые 3 — $\Delta f = -33$ кГц, кривые 4 — $\Delta f = -50$ кГц

Развитие сигнала рассеяния от искусственных периодических неоднородностей E -области (см. рис. 2*д*, *е*) характеризуется достижением максимальной интенсивности на 1-й секунде нагрева, далее рассеянный сигнал уменьшается по интенсивности примерно на 15 дБ для обеих частот волны накачки на временах развития эффекта аномального ослабления.

После выключения нагрева начинает наблюдаться восстановление интенсивности диагностической волны (релаксация эффекта аномального ослабления), где также можно выделить быструю и медленную стадии. Восстановление интенсивности на первой стадии на 10 дБ происходит на характерных временах $\tau_{\text{РАО1}} \approx 3 \div 4$ с для $f_0 = 4740$ кГц и $\tau_{\text{РАО1}} \approx 9 \div 10$ с для $f_0 = 5600$ кГц (рис. 2в, з). С этими характерными временами достигаются и максимумы интенсивности диагностического ИРИ в режиме зондирования после $t = 30$ с (рис. 2ж, з). Далее интенсивность диагностической волны медленно восстанавливается до своего невозмущённого уровня.

Характерные времена релаксации сигнала, рассеянного на искусственных неоднородностях, после выключения нагрева изменяются в пределах $\tau_{\text{РИПН}} \approx 0,09 \div 1,5$ с и имеют меньшие значения в начале процесса релаксации (рис. 2д, е). Здесь следует отметить следующее. В классических измерениях времён релаксации искусственных периодических неоднородностей на различных высотах E -области, как правило, используются импульсы с длительностью $20 \div 50$ мкс [5], что позволяет повысить пространственное разрешение измерений и определять вариации характерных времён развития и релаксации неоднородностей на различных действующих высотах ионосферы (для E -слоя эти высоты близки к истинным высотам). В наших измерениях использовались диагностические импульсы с длительностью 200 мкс, т. е. на порядок длиннее, что позволяло получать лишь интегральную по высоте информацию о динамике развития и релаксации неоднородностей до уровня, определяемого наличием слабого спорадического слоя E_s в паузе между нагревами. Наблюдаемая двуступенчатая интегральная картина релаксации неоднородностей может определяться просто их различными временами релаксации на различных высотах. Тем не менее, в данных измерениях мы получаем полную информацию о границах времён релаксации искусственных периодических неоднородностей в E -области ионосферы.

Сразу после окончания нагрева наблюдается резкое уменьшение интенсивности диагностического ИРИ (см. рис. 2а, б, ж, з после 30-й секунды). Этот процесс был исследован в измерениях с максимально возможным временным разрешением 20 мс, равным периоду следования зондирующих импульсов после нагрева. Временное поведение сигнала сразу после перехода в диагностический режим при $t > 30$ с показано на рис. 3 для $\Delta f = 0$ (для ИРИ на частоте волны накачки). В процессе релаксации излучения можно выделить две стадии с характерными временами около 62 и 450 мс. Причины такого поведения ИРИ в настоящее время остаются неясными.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИМПУЛЬСОВ С ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 25 мс

2.1. Методика измерений

В период 2014–2015 годов на стенде «Сура» были проведены две кампании по исследованию процессов распространения искусственных плазменных возмущений с помощью измерений характеристик ИРИ. Измерения проводились 19–23 августа 2014 года (нагрев с наклоном диаграммы направленности стенда на 12° на юг в направлении магнитного зенита) и 17–18 сентября 2015 года (вертикальный нагрев). В подобного рода измерениях используются две различные частоты воздействия: частота волны накачки при синфазном излучении двух передатчиков стенда «Сура» для создания возмущённой области ионосферы и диагностическая частота для третьего передатчика стенда, большая (или меньшая) частоты волны накачки на $600 \div 900$ кГц для создания области слабой (дополнительной) турбулентности выше (или ниже) центра основной области возму-

щений. Эффекты воздействия распространяющихся снизу вверх (сверху вниз) плазменных возмущений после включения и выключения волны накачки наблюдаются по изменению динамических характеристик диагностического ИРИ в области дополнительной искусственной турбулентности. При этом интенсивность распространяющихся искусственных плазменных возмущений, обусловленных воздействием волны накачки, должна была быть сравнима или превосходить интенсивность дополнительной турбулентности, создаваемой маломощной диагностической волной. Для этого можно использовать два подхода при постановке экспериментов.

В первом случае снижается мощность непрерывной диагностической волны, что приводит к уменьшению эффективности генерации диагностического ИРИ и уменьшению ширины его спектра. Тогда даже слабые внешние распространяющиеся возмущения способны существенным образом повлиять на интенсивность ИРИ. При этом достигается и максимальное временное разрешение, поскольку диагностическое ИРИ регистрируется непрерывно. В период 19–20 августа 2014 года (18:23÷21:30 MSK и 18:50÷23:14 MSK) для создания искусственных возмущений использовалось синфазное излучение двух передатчиков стенда с мощностью излучения 120 и 200 кВт на частоте 4740 кГц (или 4300 кГц). Для диагностики применялось излучение непрерывной диагностической волны с мощностью 50÷100 кВт на частоте 5640 кГц (или 4740 кГц). Диагностическая волна излучалась в режиме с параметрами $\tau_{\text{и}} = 3$ мин и $T_{\text{и}} = 4$ мин (или $\tau_{\text{и}} = 1$ мин, $T_{\text{и}} = 2$ мин). Через минуту после включения диагностической волны начинали излучаться импульсы волны накачки с параметрами $\tau_{\text{и}} = 1$ с, $T_{\text{и}} = 4$ с в течение 1 мин (или с $\tau_{\text{и}} = 2$ с, $T_{\text{и}} = 5$ с в течение 45 с). В экспериментах 19–20 августа 2014 года мощность диагностической волны составляла половину либо четверть от полной мощности передатчика. При этом оказалось, что интенсивность диагностического ИРИ насыщается и практически не реагирует на внешние воздействия — импульсы волны накачки с длительностью 1÷2 с и периодом повторения 4÷5 с. Попытки дальнейшего снижения мощности диагностического передатчика стенда приводили к его возбуждению и усилению излучения паразитных шумов в широком диапазоне частот.

Во втором случае диагностическая волна излучается импульсно. При этом снижается не пиковая, а средняя мощность излучения передатчика, которая определяет генерацию верхнегибридных компонент в спектре диагностического ИРИ. Снижение средней мощности определяется скважностью диагностических импульсов $T_{\text{и}}/\tau_{\text{и}}$. Временное разрешение при такой диагностике ухудшается и определяется периодом повторения этих импульсов $T_{\text{и}}$. Выигрыш заключается в том, что интенсивность вторичной турбулентности, определяемая средней мощностью, резко уменьшается. Однако в импульсе можно использовать максимальную пиковую мощность передатчика, что приводит к быстрой генерации ИРИ в импульсе при приходе внешних возмущений и отсутствии паразитных шумов аппаратуры. Подобные режимы были использованы в измерениях 23 августа 2014 года и 17–18 сентября 2015 года. Диагностическая волна излучалась в режиме с параметрами $\tau_{\text{и}} = 25$ мс и $T_{\text{и}} = 200$ мс, что приводило к снижению средней мощности излучения в 8 раз (до 1÷2 МВт), практически до порогов генерации ИРИ [6]. Временное разрешение измерений при этом определяется периодом повторения диагностических импульсов $T_{\text{и}} = 200$ мс. Волна

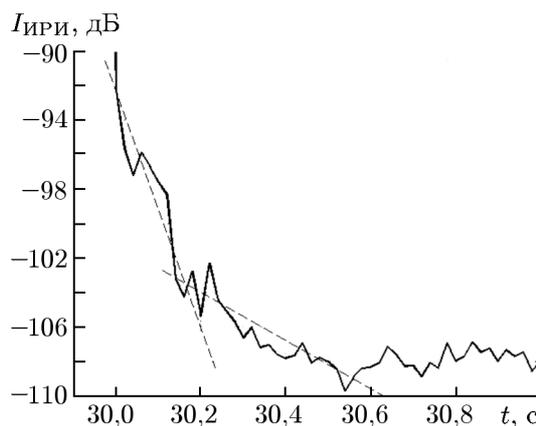


Рис. 3. Пример процесса релаксации диагностического ИРИ от импульса к импульсу при переходе от нагрева к зондированию ионосферы в момент времени от начала нагрева $t = 30$ с. 14:00÷15:00 MSK 15 марта 2010 года, $f_0 = 5600$ кГц

накачки излучалась импульсами с параметрами $\tau_{\text{и}} = 1 \div 3$ с и $T_{\text{и}} = 5 \div 10$ с в течение $60 \div 90$ с на частотах, сдвинутых на $\pm(600 \div 900)$ кГц. Ниже рассмотрены результаты этих измерений.

2.2. Анализ данных измерений и полученные результаты

Исследование процессов переноса плазменных возмущений по измерениям динамики диагностического ИРИ на сдвинутой относительно частоты волны накачки f_0 диагностической частоте $f_{\text{д}}$ сводится, в первую очередь, к определению времени задержки отклика диагностического излучения на включение и выключение волны накачки. Измеряя время задержки $t_{\text{з}}$ и определяя разницу истинных высот центров области возмущения основной и дополнительной турбулентности ионосферы из ионограмм, можно оценивать вертикальную скорость распространения этих возмущений V .

На рис. 4 для наблюдений 17 сентября 2015 года приведены два последовательных сеанса воздействия на ионосферу, сначала непрерывной (а), а затем импульсной волной накачки с параметрами $\tau_{\text{и}} = 3$ с и $T_{\text{и}} = 10$ с (б). Здесь и далее истинные высоты отражения нагревной (h_0) и диагностической ($h_{\text{д}}$) волн и значения критической частоты F_2 -слоя указаны в подписях к рисункам.

Для случая непрерывной волны накачки с частотой $f_0 = 4950$ кГц хорошо видно, что интенсивность ИРИ в области его главного спектрального максимума при отстройке $\Delta f = f_{\text{ИРИ}} - f_0 = -9$ кГц быстро достигает своего максимума за время около $1 \div 2$ с, а затем плавно выходит на более низкий стационарный уровень (overshoot-эффект [7]). Для диагностического ИРИ наблюдается временная задержка $t_{\text{з}} \approx 5 \div 6$ с усиления интенсивности излучения от квазистационарного уровня, определяемого «непрерывным» импульсным зондированием на частоте $f_{\text{д}} = 4350$ кГц в режиме с параметрами $\tau_{\text{и}} = 25$ мс и $T_{\text{и}} = 200$ мс. Оценка скорости распространения плазменных возмущений даёт величину $V = (h_0 - h_{\text{д}})/t_{\text{з}} \approx (2,0 \div 2,4) \cdot 10^5$ см/с и близка к тепловой скорости ионов $V_{\text{Ti}} \approx 10^5$ см/с. После этого диагностическое излучение начинает плавно нарастать до стационарного уровня. После выключения волны накачки сигнал диагностического ИРИ релаксирует, испытывая небольшой обратный overshoot-эффект, до прежнего квазистационарного уровня вместе с релаксацией внешних плазменных возмущений. Характерное время релаксации $t_{\text{р}} \approx 4$ с определяется временем диффузии плазменных возмущений, ответственных за усиление генерации диагностического ИРИ.

При импульсном нагреве ионосферы (рис. 4б) величина начальной временной задержки возрастает до $t_{\text{з}} \approx 10$ с, но из-за роста расстояния между высотами отражения нагревной и диагностической волн до $\Delta h \approx 20$ км оценка для скорости $V \approx 2 \cdot 10^5$ см/с не изменяется. Особенностью импульсного воздействия является появление anomalно быстрого (уже через $t_{\text{аз}} \approx 200$ мс после включения импульса волны накачки) и короткого (около 1 с), очень резкого (вплоть до начального квазистационарного уровня излучения без подогрева) подавления интенсивности диагностического излучения на фоне его общего усиления в паузах между импульсами. Этот эффект наблюдается сразу после начальной временной задержки в условиях усиления внешних возмущений в области дополнительной турбулентности плазмы. В данном случае скорость распространения влияния волны накачки на диагностическое излучение становится anomalно высокой, близкой к тепловой скорости электронов: $V_{\text{а}} = \Delta h/t_{\text{аз}} \approx 10^7$ см/с $\approx V_{\text{Te}}/2$. Подобные эффекты были отмечены ранее в работе [3].

На рис. 4в, г и на рис. 5 (для другого режима импульсного нагрева с параметрами $\tau_{\text{и}} = 1$ с и $T_{\text{и}} = 5$ с) приведены осциллограммы интенсивности волны накачки и диагностического ИРИ, для уменьшения дисперсии измерений усреднённые по нескольким близким по параметрам 3-минутным циклам импульсного воздействия. Из рисунков видно, что в условиях накопления

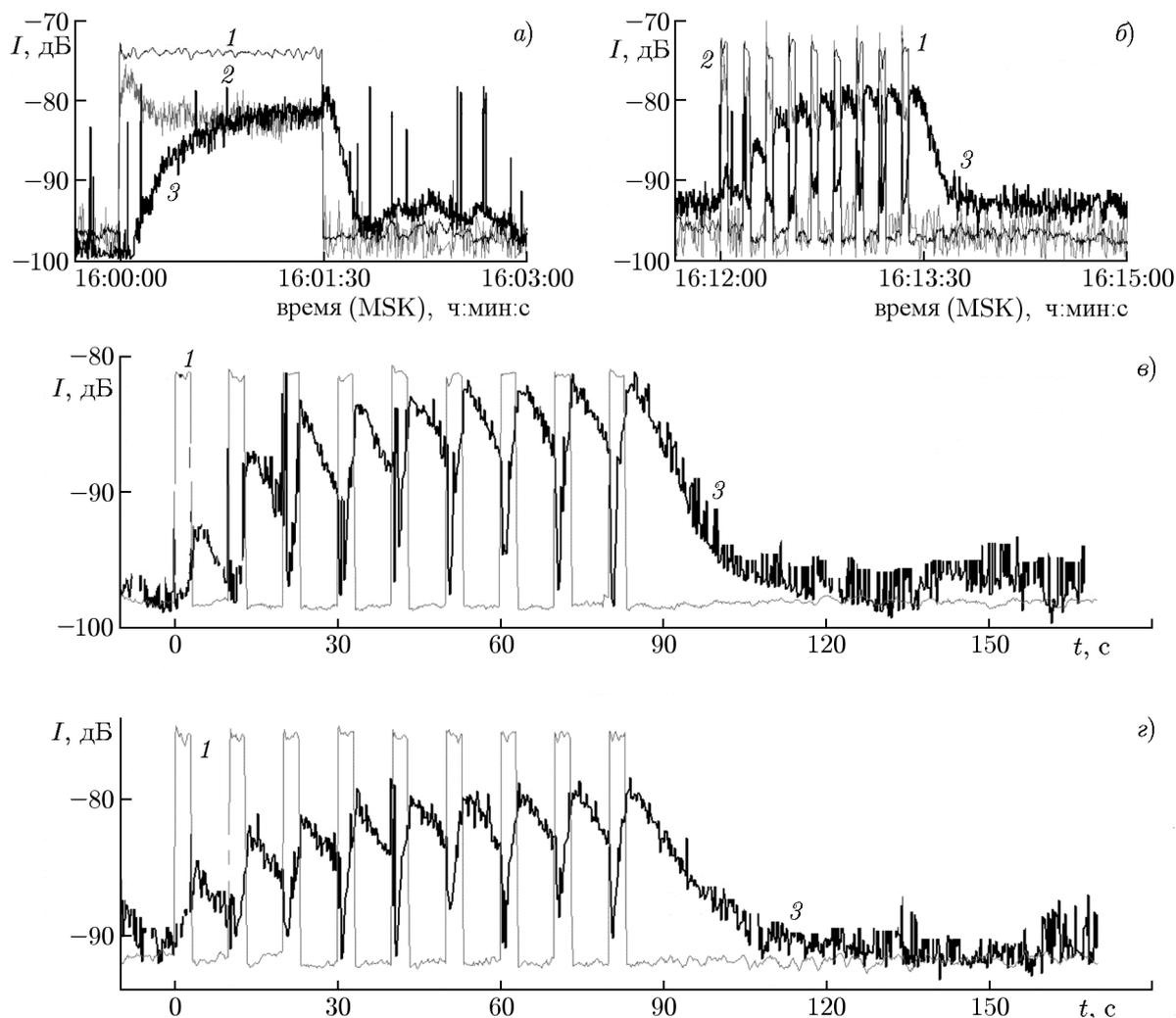


Рис. 4. Динамика волны накачки (1), ИРИ (2) и диагностического ИРИ (3) в области главного спектрального максимума ($\Delta f = f_{\text{ИРИ}} - f_0 = -9$ кГц) при непрерывном нагреве (а) и нагреве импульсами с параметрами $\tau_{\text{и}} = 3$ с и $T_{\text{и}} = 10$ с (б) в течение 90 с, импульсном нагреве и усреднении по 5-ти циклам (16:18÷16:33 MSK, (в)), импульсном нагреве и усреднении по 4-м циклам (16:18÷16:33 MSK, (з)). Эксперимент 17.09.2015, $f_0 = 4950$ кГц, $f_{\text{д}} = 4350$ кГц, параметры ионосферы: $h_0 = 184$ км, $h_{\text{д}} = 172$ км, $f_{0F_2} = 5,3$ МГц (а); $h_0 = 220$ км, $h_{\text{д}} = 200$ км, $f_{0F_2} = 5,45$ МГц (б); $h_0 = 241 \div 232$ км, $h_{\text{д}} = 211 \div 214$ км, $f_{0F_2} = 5,1 \div 5,2$ МГц (в); $h_0 = 228$ км, $h_{\text{д}} = 215$ км, $f_{0F_2} = 5,3$ МГц (з)

начальной возмущённости в ионосфере от сеанса к сеансу начальная временная задержка может уменьшаться и составляет $t_3 \approx 3 \div 7$ с для $\Delta h \approx 20 \div 30$ км ($V \approx (4 \div 6) \cdot 10^5$ см/с), а эффекты аномального подавления диагностического ИРИ в импульсе несколько ослабевают с ростом разницы высот Δh . Кроме того, отметим и наблюдаемое возрастание времён релаксации диагностического ИРИ до $t_p \approx 33$ с при приближении частоты волны накачки к критической частоте F_2 -слоя (см. рис. 5в).

На рис. 6 для наблюдений 18 сентября 2015 года, аналогично рис. 4 для предыдущего дня наблюдений, приведены данные двух последовательных сеансов воздействия на ионосферу, сначала непрерывной, а затем импульсной волной накачки с параметрами $\tau_{\text{и}} = 3$ с и $T_{\text{и}} = 10$ с. В данном случае непрерывная волна накачки с частотой $f_0 = 4740$ кГц создавала возмущённую область под областью дополнительной турбулентности для диагностической волны с частотой

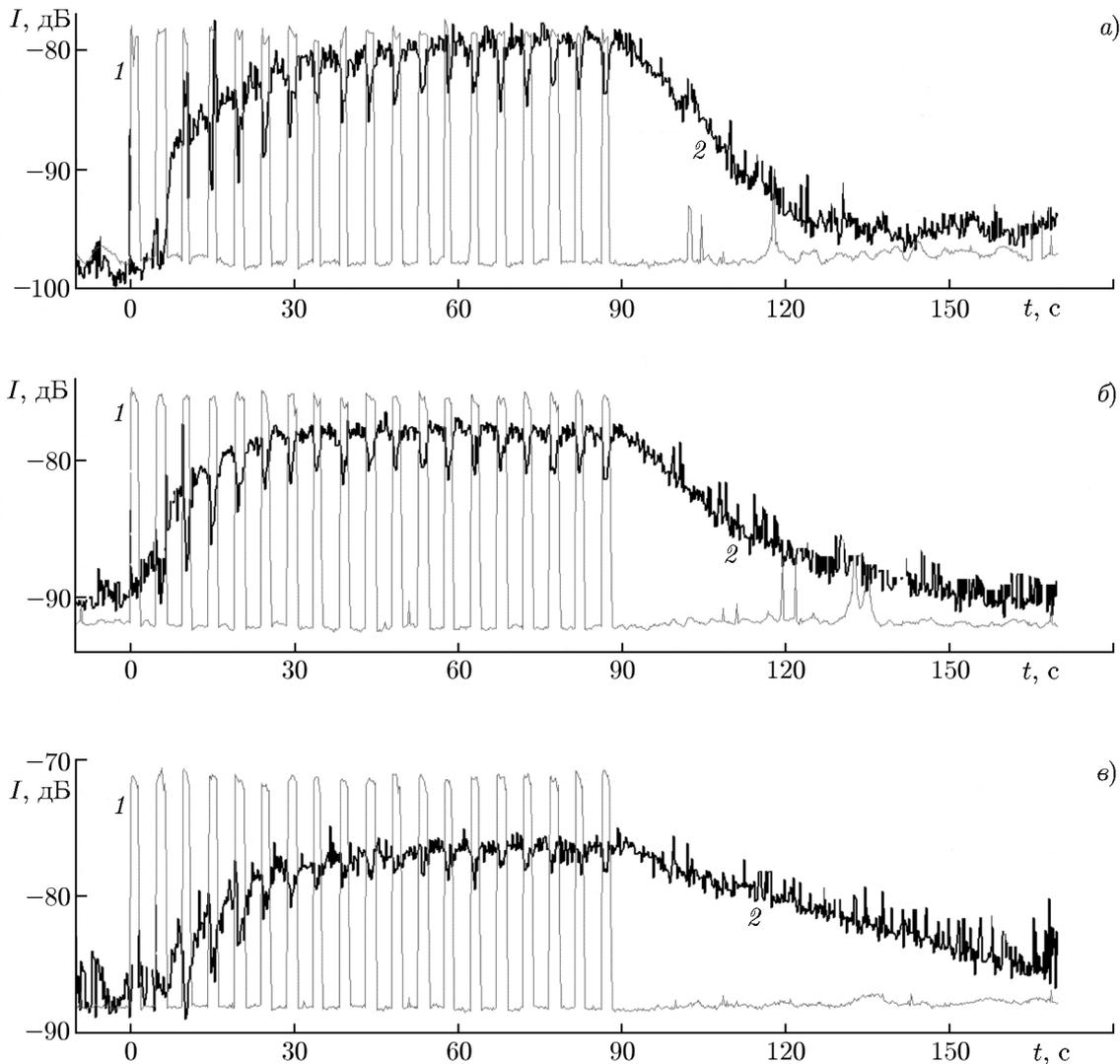


Рис. 5. Динамика волны накачки (1) и диагностического ИРИ (2) в области главного спектрального максимума ($\Delta f = f_{\text{ИРИ}} - f_0 = -9$ кГц) при импульсном нагреве ($\tau_{\text{и}} = 3$ с, $T_{\text{и}} = 10$ с) в течение 90 с и усреднении по 2-м циклам (16:52÷16:58 MSK, а), усреднении по 5-ти циклам (16:58÷17:13 MSK, б) и усреднении по 3 циклам (17:13÷17:21 MSK, в). Эксперимент 17.09.2015, $f_0 = 4950$ кГц, $f_{\text{д}} = 4350$ кГц, параметры ионосферы: $h_0 = 227$ км, $h_{\text{д}} = 207$ км, $f_{0F_2} = 5,2$ МГц (а); $h_0 = 226 \div 334$ км, $h_{\text{д}} = 202 \div 204$ км, $f_{0F_2} = 5,2 \div 5,10$ МГц (б); $h_0 = 240$ км, $h_{\text{д}} = 211$ км, $f_{0F_2} = 5,0$ МГц (в)

$f_{\text{д}} = 5640$ кГц. Для диагностического ИРИ наблюдаемая начальная временная задержка в усилении интенсивности излучения составляла $t_3 \approx 10$ с. С учётом разницы высот $\Delta h \approx 30 \div 50$ км оценка скорости распространения плазменных возмущений даёт величину $V \approx (3 \div 5) \cdot 10^5$ см/с. Времена аномально короткой задержки в импульсе волны накачки для максимальной разницы $\Delta h \approx 50$ км возрастают до $t_{\text{аз}} \approx 500$ мс ($V_{\text{а}} = \Delta h / t_{\text{аз}} \approx 10^7$ см/с $\approx V_{T_e} / 2$), становится также хорошо видна задержка начала процесса релаксации диагностического ИРИ после выключения очередного импульса волны накачки с $t_{\text{зр}} \approx 1$ с (см. рис. 6з). Времена релаксации излучения по окончании импульсного нагрева, как и в предыдущий день измерений, возрастают при приближении теперь уже частоты диагностической волны к критической частоте слоя F_2 от 10 до 56 с (см рис. 6б и з).

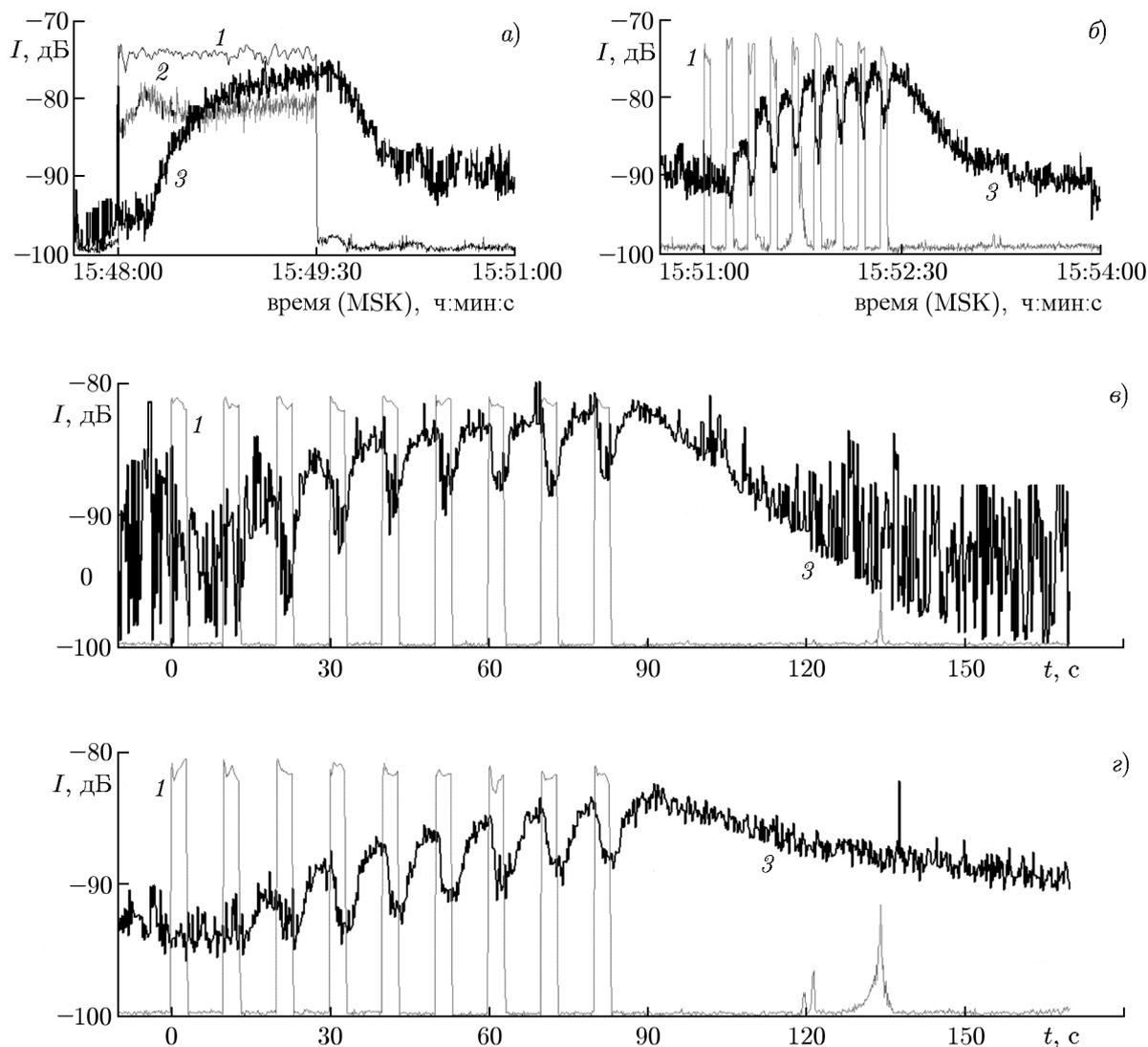


Рис. 6. Динамика волны накачки (1), ИРИ (2) и диагностического ИРИ (3) в области главного спектрального максимума ($\Delta f = f_{\text{ИРИ}} - f_0 = -9$ кГц) при непрерывном нагреве (а) и нагреве импульсами ($\tau_{\text{и}} = 3$ с, $T_{\text{и}} = 10$ с) в течение 90 с (б), импульсном нагреве и усреднении по 6-ти циклам (15:57÷16:15 MSK, в), импульсном нагреве и усреднении по 3-м циклам (16:15÷16:24 MSK, г). Эксперимент 18.09.2015, $f_0 = 4740$ кГц, $f_d = 5640$ кГц, параметры ионосферы: $h_0 = 209$ км, $h_d = 237$ км, $f_{0F_2} = 5,85$ МГц (а); $h_0 = 209$ км, $h_d = 237$ км, $f_{0F_2} = 5,85$ МГц (б); $h_0 = 205 \div 230$ км, $h_d = 230 \div 235$ км, $f_{0F_2} = 5,9$ МГц (в); $h_0 = 211$ км, $h_d = 260$ км, $f_{0F_2} = 5,65$ МГц (г)

На рис. 7 представлены данные измерений 23 августа 2014 года при наклоне диаграммы направленности станда «Сура» на 12° на юг (в направлении магнитного зенита). При разнице высот нагревной и диагностической волн $\Delta h \approx 10 \div 15$ км наблюдались начальные задержки до $t_3 \approx 10$ с, соответствующие скоростям перемещения возмущений $V \approx (1,0 \div 1,5) \cdot 10^5$ см/с. В отличие от вертикального воздействия, слабые эффекты аномального ослабления диагностического излучения в импульсе волны накачки наблюдались лишь при нагреве на частоте $f_0 = 4740$ кГц и диагностике верхней части возмущённой области на большей частоте $f_d = 5640$ кГц (рис. 7а). При этом регистрировались и более длинные времена релаксации диагностического ИРИ $t_p \approx 36$ с. В обратном

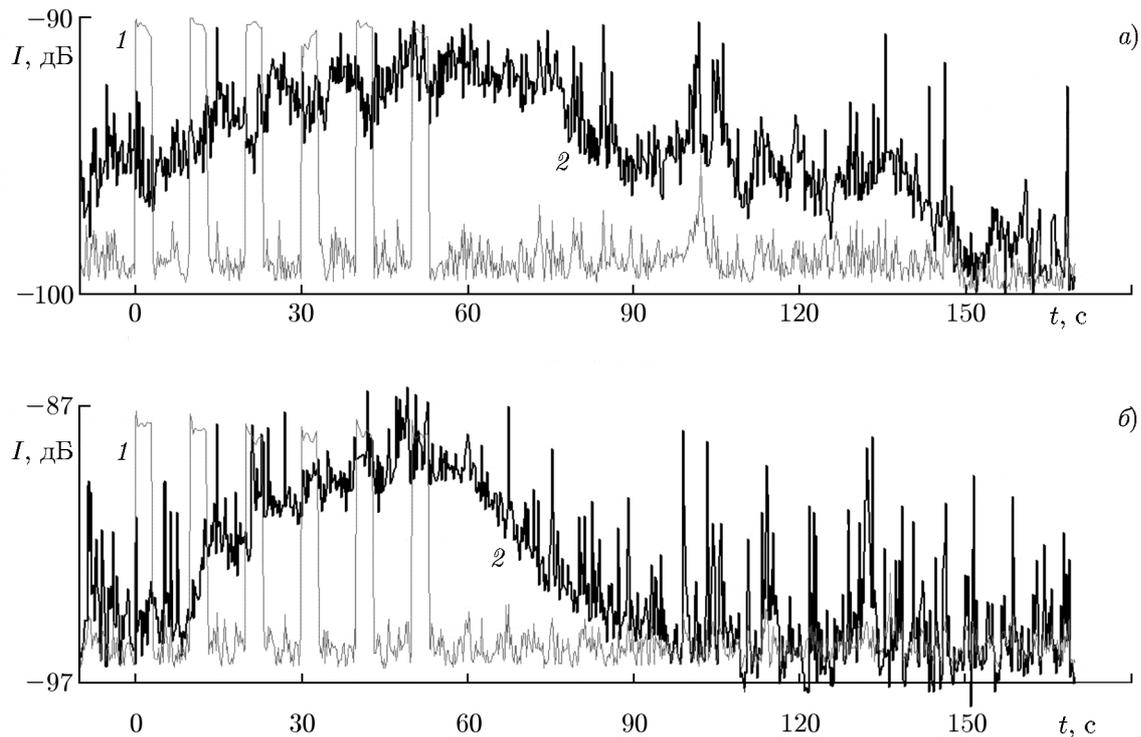


Рис. 7. Динамика волны накачки (1) и диагностического ИРИ (2) в области главного спектрального максимума ($\Delta f = f_{\text{ИРИ}} - f_0 = -9$ кГц) при импульсном нагреве ($\tau_{\text{н}} = 3$ с, $T_{\text{н}} = 10$ с) в течение 60 с и усреднении по 2-м циклам ($f_0 = 4740$ кГц, $f_{\text{д}} = 5640$ кГц, 20:18÷20:23 MSK, а) и усреднении по 5-ти циклам ($f_0 = 5640$ кГц, $f_{\text{д}} = 4740$ кГц, 21:10÷21:24 MSK, б). Эксперимент 23.08.2014, параметры ионосферы: $h_0 = 230$ км, $h_{\text{д}} = 246$ км, $f_{0F_2} = 6,7$ МГц (а) и $h_0 = 245\div 251$ км, $h_{\text{д}} = 234\div 236$ км, $f_{0F_2} = 7,05\div 7,15$ МГц (б)

случае во время импульсного нагрева на частоте $f_0 = 5640$ кГц при зондировании нижней части возмущённой области на частоте $f_{\text{д}} = 4740$ кГц наблюдалось лишь усиление диагностического излучения (рис. 7б). Времена его релаксации после выключения нагрева составляли $t_{\text{р}} \approx 19$ с.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования показывают широкие возможности использования коротких диагностических импульсов для исследования процессов генерации, релаксации и переноса плазменных возмущений с помощью диагностического ИРИ. Оптимальность метода обеспечивается использованием чередования квазинепрерывного режима нагрева с диагностическим излучением очень коротких импульсов, не приводящих к поддержанию искусственной турбулентности, а также возможностью совмещения этого метода исследования плазменной турбулентности F -слоя с методом зондирования искусственных периодических неоднородностей E -слоя [5] и методом широкополосного доплеровского зондирования для изучения модификаций профиля электронной концентрации в области плазменных резонансов [1, 8]. Использование усреднения динамики ИРИ по нескольким циклам измерений позволяет проводить измерения характеристик излучения с высоким временным разрешением и сопоставлять их с эволюцией волны накачки. В ходе анализа обнаружено возрастание декрементов затухания излучения до трёх раз во время нагрева, связываемое нами, как и в работах [9, 10], с ростом бесстолкновительного затухания плазменных

волн во время нагрева. Также было проведено сопоставление медленной динамики развития и релаксации излучения от импульса к импульсу с эволюцией волны накачки и установлено соответствие характеристик overshoot-эффекта в динамике ИРИ характеристикам эффекта аномального ослабления волны накачки. Кроме того, наблюдается соответствие временных масштабов порядка десятков–сотен миллисекунд для переходных процессов изменения спектров импульсного ИРИ после выключения волны накачки и процессов релаксации искусственных периодических неоднородностей E -слоя.

В ходе анализа данных экспериментов по исследованию процессов переноса плазменных возмущений выявлено наличие двух характерных времён развития эффектов в области дополнительной турбулентности для диагностической волны: порядка нескольких секунд (до десятка секунд) при включении непрерывного нагрева и порядка нескольких сотен миллисекунд при импульсном нагреве ионосферы. При этом наблюдаемое подавление диагностического излучения при нагреве импульсами может достигать 100% — вплоть до невозмущённого уровня диагностического ИРИ до нагрева. Подобной двойной реакции на воздействие при наклоне диаграммы направленности стэнда в направлении магнитного зенита (12° на юг) в экспериментах 2014 года практически не наблюдалось. Данные измерений свидетельствуют, что моменты включения волны накачки в «подготовленной» ионосферной турбулентности сопровождаются созданием условий подавления дополнительной турбулентности (и диагностического ИРИ) даже на значительном удалении от основного источника возмущений. Времена распространения данных возмущений более чем на порядок меньше (а скорости, соответственно, больше, они достигают значений $V_a \approx 10^7$ см/с $\approx V_{Te}/2$) по сравнению с временами распространения начальных возмущений, создаваемых волной накачки в «неподготовленной» ионосфере и распространяющихся со скоростями $V \approx (1\div 6) \times 10^5$ см/с $\approx V_{Ti}$. Спектры искусственных неоднородностей, приводящие к подобному поведению диагностического ИРИ, должны существенным образом отличаться при непрерывном и импульсном нагреве, причём во всей толще возмущённой области. Времена релаксации возмущений после выключения нагрева отвечают распаду искусственных неоднородностей декаметровых масштабов в направлении, поперечном к геомагнитному полю [11].

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 14–12–00706 —раздел 2, первая часть раздела 4, проект 14–12–00556 —раздел 3, вторая часть раздела 4) и РФФИ (проекты 16–02–00798, 16–32–60176, спектральная обработка и усреднение данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Котов П. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 649.
2. Фролов В. Л., Сергеев Е. Н., Штуббе П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 2. С. 121.
3. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Недзвецкий Д. И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 11. С. 643.
4. Sergeev E. N., Frolov V. L., Grach S. M., Kotov P. V. // Adv. Space Res. 2006. V. 38, No. 11. P. 2518.
5. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Толмачёва А. В., Бахметьева Н. В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. 156 с.
6. Фролов В. Л., Бойко Г. Н., Метелёв С. А., Сергеев Е. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 7. С. 909.

7. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 7. С. 619.
8. Shindin A. V., Sergeev E. N., Grach S. M. // Radio Sci. 2012. V. 47, RS0N04.
9. Сергеев Е. Н., Фролов В. Л., Бойко Г. Н., Комраков Г. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41, № 3. С. 313.
10. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Тиде Б. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 3. С. 214.
11. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Metelev S. A., Sergeev E. N. // J. Atm. Terr. Phys. 1997. V. 59, No. 18. P. 2263.

Поступила в редакцию 16 августа 2016 г.; принята в печать 3 ноября 2016 г.

**DIAGNOSTICS OF THE GENERATION, DECAY, AND TRANSFER
OF ARTIFICIAL PLASMA PERTURBATIONS BY MEANS OF SHORT
PULSES OF A HIGH-POWER RADIO EMISSION**

E. N. Sergeev, S. M. Grach, V. L. Frolov, and A. V. Shindin

We discuss the method of measuring and the possibilities of using high-power short pulses of the pump wave for diagnostics of the properties of high- and low-frequency ionospheric plasma turbulence. The results of the experimental studies performed using the “Sura” heating facility are presented.