

УДК 533.951+537.868

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ. I. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Е. Н. Сергеев^{1,2}, *С. М. Грач*^{1,2*}

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт;

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

Рассматриваются возможности изучения эволюции спектра плазменных волн и искусственных неоднородностей концентрации плазмы на различных высотах возмущённой области ионосферы, модифицированной мощным коротковолновым излучением нагревного стенда «Сура», по данным измерений динамических характеристик диагностического искусственного радиоизлучения ионосферы.

ВВЕДЕНИЕ

Искусственное радиоизлучение ионосферы, обнаруженное в экспериментах по воздействию на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением, представляет собой достаточно слабую шумовую компоненту в спектре отражённого от ионосферы сигнала волны накачки [1, 2]. Искусственное радиоизлучение ионосферы привлекло внимание исследователей возможностью использовать его характеристики для дистанционного изучения свойств искусственной ионосферной турбулентности. Исследования показали, что наблюдаемый многокомпонентный спектральный состав излучения отражает развитие и конкуренцию плазменных неустойчивостей различных типов. Данные неустойчивости отвечают за генерацию и взаимодействие различных высокочастотных плазменных мод и низкочастотных возмущений концентрации плазмы, составляющих искусственную ионосферную турбулентность. Основную роль в возбуждении искусственной ионосферной турбулентности играют стрикционная и тепловая параметрические неустойчивости плазмы в поле мощной радиоволны [3–5]. Генерируемые при этом ленгмюровские волны (вблизи высоты отражения волны накачки, где частота волны накачки f_0 совпадает с плазменной частотой f_p), верхнегибридные (вблизи уровня верхнегибридного резонанса волны накачки, где выполняется равенство $f_0 \approx f_{\text{вгр}} = (f_p^2 + f_{ce}^2)^{1/2}$, f_{ce} — электронная циклотронная частота) и бернштейновские плазменные волны (при нагреве на частотах вблизи гармоник электронной гирочастоты $f_0 \approx n f_{ce}$, где $n = 2, 3, \dots$) определяют быструю (порядка миллисекунд) динамику интенсивности и форму спектра искусственного радиоизлучения ионосферы на временах развития и релаксации плазменных мод [6–8]. Возмущения концентрации плазмы, сильно вытянутые вдоль магнитного поля Земли, определяют медленную (от нескольких секунд) эволюцию интенсивности искусственного излучения: её усиление и аномальное ослабление. Характерные времена этой эволюции по порядку величины совпадают с временами развития и релаксации искусственных неоднородностей электронной концентрации с поперечными геомагнитному полю масштабами $l_{\perp} \approx 1 \div 100$ м, определяемыми процессами термодиффузии и амбиполярной диффузии [9–11]. Отличие на $2 \div 3$ порядка характерных времён эволюции плазменных волн и искусственных неоднородностей позволяет изучать их характеристики по отдельности с помощью искусственного радиоизлучения ионосферы при использовании специальных диагностических режимов мощного воздействия на ионосферную плазму.

* sg@nirfi.sci-nnov.ru

При воздействии на плазму короткими мощными радиоимпульсами с длительностью $\tau_{\text{и}} \approx 10$ мс с большим периодом повторения $T_{\text{и}} \approx 1$ с, когда эффективная мощность излучения в импульсе P превышает пороги возбуждения ленгмюровской турбулентности вблизи высоты отражения волны накачки, $P > P_{\text{пор}}^{\text{л}} \approx 1 \div 5$ МВт [12], а средняя мощность излучения не превышает порогов генерации плазменных неоднородностей, $\langle P \rangle = P (\tau_{\text{и}}/T_{\text{и}}) < P_{\text{пор}}^{\text{н}} \approx 1 \div 5$ МВт [13], в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) наблюдается только узкополосная компонента (narrow continuum, NC) в диапазоне отрицательных отстроек от частоты волны накачки $\Delta f = f_{\text{ИРИ}} - f_0 \approx -(0 \div 30)$ кГц [14].

С ростом длительности нагрева на временах $t > 1$ с область генерации плазменных волн и неоднородностей концентрации плазмы в ионосфере снижается до высоты верхнегибридного резонанса (на $5 \div 10$ км ниже уровня отражения). Спектр искусственного радиоизлучения ионосферы при этом определяется генерацией верхнегибридных плазменных волн и обладает более богатой структурой. На данном этапе развития возмущённой области в спектре излучения выделяются главный спектральный максимум на отстройках частоты $\Delta f_{\text{М}} \approx -(9 \div 12)$ кГц (downshifted maximum, DM), менее интенсивный и симметричный ему положительный максимум с отстройкой $\Delta f_{\text{ПМ}} \approx +(7 \div 10)$ кГц (upshifted maximum, UM) и широкополосную компоненту излучения с отстройкой $\Delta f_{\text{Ш}} \approx -(15 \div 80)$ кГц (broad continuum, BC). При нагреве плазмы на частотах около гармоник гирочастоты электронов для $f_0 > n f_{\text{ce}}$ наблюдается генерация широкого положительного максимума с отстройкой частоты $\Delta f_{\text{ШПМ}} \approx f_0 - n f_{\text{ce}} \approx +(15 \div 150)$ кГц (broad upshifted maximum, BUM) [2, 15]. Динамика этих компонент отражает развитие спектра искусственных неоднородностей плазмы.

Для исследования верхнегибридных плазменных волн с помощью искусственного радиоизлучения ионосферы, в частности их декрементов затухания, вместо непрерывного нагрева может использоваться квазинепрерывный нагрев с параметрами $\tau_{\text{и}} \approx T_{\text{и}} = 100 \div 200$ мс и короткой паузой в нагреве ($T_{\text{и}} - \tau_{\text{и}} = 20 \div 30$ мс). За время короткой паузы высокочастотные плазменные моды успевают полностью релаксировать, при этом интенсивность низкочастотных возмущений концентрации плазмы практически не меняется.

После выключения длительного воздействия искусственное радиоизлучение ионосферы релаксирует в течение нескольких миллисекунд, однако времена релаксации искусственных неоднородностей составляют от единиц до десятков секунд. При использовании после нагрева коротких диагностических импульсов с длительностью $\tau_{\text{и}} \ll T_{\text{и}}$ и мощностью, достаточной для генерации «верхнегибридного» искусственного радиоизлучения ионосферы в условиях релаксации искусственных неоднородностей и недостаточной для их поддержания средней мощностью, по изменениям характеристик такого диагностического излучения можно наблюдать за эволюцией распада спектра низкочастотной турбулентности в области метровых и декаметровых масштабов.

Поскольку искусственные неоднородности концентрации плазмы сильно вытянуты вдоль магнитного поля Земли при малых углах наклона геомагнитного поля к вертикали (такая ситуация имеет место на стендах «Сура», EISCAT, HAARP и SPEAR) протяжённость возмущённой области ионосферы по высоте может достигать нескольких десятков километров. При этом режим диагностического зондирования на частотах $f_{\text{д}} \neq f_0$ позволяет генерировать плазменные волны и диагностическое радиоизлучение на различных высотах возмущённой области, где выполняются равенства $f_{\text{д}} \approx f_{\text{р}}$ (узкополосная компонента диагностического излучения), либо $f_{\text{д}} \approx (f_{\text{р}}^2 + f_{\text{ce}}^2)^{1/2}$ («верхнегибридные» компоненты диагностического излучения). Таким образом, появляется возможность оценивать пространственные изменения в частотном спектре искусственных неоднородностей с помощью исследования характеристик диагностического искусственного радиоизлучения ионосферы в зависимости от удалённости его области генерации по высоте от центра возмущённой области.

Подобные измерения проводились на нагревном стенде «Сура» (Васильсурск), начиная с 1990 года [8, 10, 11, 13]. Однако только в 2003 году с появлением современной цифровой техники для регистрации и обработки данных удалось достаточно детально исследовать пространственно-временную структуру возмущённой области ионосферы по измерениям характеристик диагностического излучения для различных частот нагрева и зондирования в различное время суток. В первой части данной работы приводятся данные по вариациям формы и интенсивности спектров различных компонент искусственного радиоизлучения ионосферы, времён развития и релаксации излучения в зависимости от частоты диагностической волны и волны накачки, времени суток и состояния ионосферы. Следует отметить, что данные дневных измерений были частично представлены в работе [16]. Во второй части работы данные эксперимента будут сопоставлены с результатами численного моделирования эволюции излучения для его широкополосной компоненты в рамках модели генерации искусственного радиоизлучения ионосферы, предложенной в [17] и развитой в [18, 19].

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

1.1. Методика измерений

Эксперименты по диагностике пространственно-временной структуры области ионосферы, возмущённой мощным коротковолновым радиоизлучением, с помощью измерений характеристик искусственного радиоизлучения ионосферы были выполнены на стенде «Сура» 24–25 сентября 2003 года. Для создания возмущённой области использовалось квазинепрерывное излучение обыкновенной поляризации одного из трёх передатчиков стенда с эффективной мощностью $P \approx 15 \div 20$ МВт на частоте накачки f_0 (нагревная волна). Нагрев осуществлялся в течение 120 с (дневные измерения) или 60 с (вечерние измерения) в режиме излучения импульсов с длительностью $\tau_{\text{и}} = 180$ мс и периодом повторения $T_{\text{и}} = 200$ мс. До нагрева в течение 30 с и после нагрева в течение 210–240 с излучались короткие диагностические импульсы с длительностью $\tau_{\text{и}} = 30$ мс и периодом $T_{\text{и}} = 1$ с. Средняя мощность такого излучения составляла $\langle P \rangle \approx 0,45 \div 0,60$ МВт $< P_{\text{пор}}^{\text{н}}$. Второй передатчик стенда использовался для излучения только коротких импульсов на частоте зондирования $f_{\text{д}} \neq f_0$ (диагностическая волна). Длительность подобного сеанса воздействия составляла 6 мин, после чего временные режимы излучения первого и второго передатчиков менялись местами, т. е. диагностическая волна ($f_{\text{д}}$) использовалась как нагревная (f'_0), а нагревная (f_0) — как диагностическая ($f'_{\text{д}}$), и сеанс повторялся. Такая смена режима предназначалась для смены высот центра (случай $f_0 = f_{\text{д}}$) и периферии (случай $f_0 \neq f_{\text{д}}$) возмущённой области, сравнительного изучения свойств искусственного радиоизлучения ионосферы, генерируемого нагревной и диагностической волнами, соответственно, и переноса возмущений от центра области вверх и вниз. Далее частота второго передатчика перестраивалась, и вновь проводился цикл из двух сеансов измерений. Первый передатчик стенда был постоянно настроен на частоту $f_1 = 5\,650$ или $5\,630$ кГц, частота второго передатчика изменялась в широком диапазоне $f_2 = 4\,380 \div 6\,450$ кГц.

Излучение принималось с помощью антенны из 24 четвертьволновых сложных вибраторов, имеющей три резонансные частоты 2,8, 4,75 и 5,75 МГц и расположенной примерно в 1 км от стенда. Сигнал с антенны подавался на приёмный комплекс из 8 коротковолновых приёмников типа «Катран», сопряжённых с 8-канальным 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем NI 16-MIO-E2 с частотой оцифровки до 500 кГц. Также сигнал поступал на 3-канальный коротковолновый радиоприёмник с диапазоном частот 1–32 МГц, динамическим диапазоном 100 дБ и полосой приёма до 500 кГц, сопряжённый с установленным на компьютере цифровым 2-канальным 14-разрядным модулем ADP6203PCI для обработки и регистрации сигнала проме-

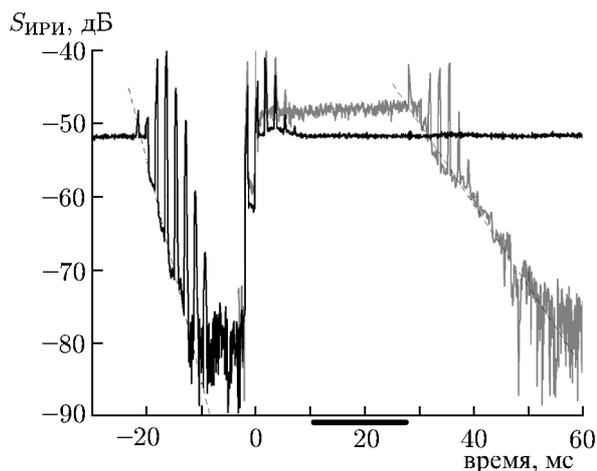


Рис. 1. Динамика искусственного радиоизлучения ионосферы при квазинепрерывном нагреве ионосферы на частоте $f_0 = 4380$ кГц (чёрная линия, усреднено 150 импульсов с длительностью $\tau_n = 180$ мс на 1–2 минуте нагрева) и при диагностическом зондировании на этой же частоте $f_d = 4380$ кГц и нагреве на частоте $f_0 = 5650$ кГц (серая линия, усреднено 60 импульсов с длительностью $\tau_n = 30$ мс на 1–2 минуте нагрева). Стенд «Сура», 18:31÷18:43 MSK 24 сентября 2003 года. Временное окно спектрального анализа (10÷27 мс) показано отрезком на оси абсцисс. Здесь и далее $S_{ири}$ — интенсивность искусственного радиоизлучения ионосферы (относительно 0,125 В)

ботке данных. Собственно сигнал искусственного радиоизлучения ионосферы наблюдается между пиками амплитуды. Характерное время развития и релаксации излучения определяет инкремент развития и декремент затухания верхнегибридных плазменных волн [6, 20]. В данном случае для квазинепрерывного нагрева времена релаксации излучения составляли $\tau_0 = 1,5$ мс, а для диагностических импульсов — $\tau_d = 3,5$ мс.

Дневные измерения были выполнены 24 сентября 2003 года, при этом верхняя часть возмущённой области ионосферы зондировалась с 14:00 до 16:25 MSK. В табл. 1 сведены используемые частоты f_0 и f_d , время начала сеансов нагрева t_n , критические частоты f_{0F_2} , высоты отражения нагревной h_0 и диагностической h_d волн и соответствующие пространственные масштабы для линейного слоя плазмы L_0 и L_d , а также характерные времена релаксации излучения τ_0 и τ_d для используемых частот первого и второго передатчиков ($f_1 = 5650$ кГц и $f_2 \neq f_1$).

Нижняя часть возмущённой области зондировалась с 16:49 до 18:42 MSK. Временные, частотные и высотные параметры сведены в табл. 2.

Вечерние измерения были выполнены 25 сентября 2003 года с 18:43 до 20:36 MSK для частоты первого передатчика $f_1 \approx 5650$ кГц и далее до 22:13 MSK для $f_1 < 5630$ кГц. При этом зондировалась только нижняя часть возмущённой области при частоте второго передатчика $f_2 < f_1$, поскольку критические частоты ионосферы уменьшались во время эксперимента вплоть до центральной опорной частоты первого передатчика стенда. Временные, частотные и высотные параметры сведены в табл. 3.

жучочной частоты 2,5 МГц. Первичная обработка заключалась в аналого-цифровом преобразовании, цифровой фильтрации и спектральном анализе комплексного входного сигнала в реальном времени. При этом сигнал искусственного радиоизлучения ионосферы вблизи рабочей частоты первого передатчика 5650 кГц анализировался, в основном, по данным измерений с нескольких приёмников «Катран» на фиксированных частотах в узкой полосе 4 кГц. Регистрация сигналов радиоизлучения вблизи рабочих частот второго передатчика проводилась в широкой полосе 100 кГц. Состояние ионосферы контролировалось с помощью ионозонда «Базис» каждые 10 мин.

Пример осциллограмм импульсов с отстройкой $\Delta f = -12$ кГц при квазинепрерывном нагреве и диагностическом зондировании с частотой 4380 кГц приведён на рис. 1. Как видно из рис. 1, при $t = 10$ мс в импульсах устанавливается стационарный уровень излучения. Периодические всплески интенсивности при включении и выключении импульсов нагрева или диагностической волны вызваны фронтами принимаемого сигнала при его многократном отражении от ионосферы и Земли. Характерная длительность всплесков около 0,5 мс определяется частотным разрешением в 2 кГц, используемым при обработке данных.

Таблица 1

| № П/П | t_H , MSK | f_{0F_2} , кГц | f_0 , кГц | f_D , кГц | h_0 , км | h_D , км | L_0 , км | L_D , км | τ_0 , мс | τ_D , мс |
|-------|-------------|------------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------|
| 1 | 14:01 | 7 000 | 5 650 | 5 725 | 200 | 203 | 78 | 82 | 1,1 | 1,2 |
| 2 | 14:07 | 6 900 | 5 725 | 5 650 | 204 | 202 | 76 | 73 | 1,4 | 1,4 |
| 3 | 14:25 | 6 700 | 5 650 | 5 910 | 203 | 211 | 75 | 87 | 1,1 | 1,4 |
| 4 | 14:31 | 6 750 | 5 910 | 5 650 | 212 | 204 | 82 | 74 | 1,5 | 1,1 |
| 5 | 14:37 | 6 500 | 5 650 | 6 000 | 207 | 219 | 79 | 111 | 1,3 | 1,6 |
| 6 | 14:43 | 6 500 | 6 000 | 5 650 | 219 | 207 | 113 | 80 | 2,0 | 1,3 |
| 7 | 15:01 | 6 550 | 5 650 | 6 100 | 219 | 238 | 115 | 135 | 1,3 | 1,8 |
| 8 | 15:07 | 6 900 | 6 100 | 5 650 | 225 | 211 | 96 | 82 | 2,0 | 1,1 |
| 9 | 15:37 | 7 000 | 5 650 | 6 200 | 200 | 212 | 52 | 70 | 0,9 | 1,4 |
| 10 | 15:43 | 7 000 | 6 200 | 5 650 | 212 | 200 | 70 | 52 | — | 1,1 |
| 11 | 15:55 | 6 800 | 5 650 | 6 300 | 200 | 218 | 69 | 110 | 0,9 | 1,5 |
| 12 | 16:01 | 6 800 | 6 300 | 5 650 | 218 | 200 | 110 | 69 | 1,8 | 1,1 |
| 13 | 16:13 | 6 700 | 5 650 | 6 450 | 202 | 228 | 73 | 170 | 1,1 | 1,6 |
| 14 | 16:19 | 6 600 | 6 450 | 5 650 | 233 | 204 | 220 | 75 | 1,7 | 1,1 |

Таблица 2

| № П/П | t_H , MSK | f_{0F_2} , кГц | f_0 , кГц | f_D , кГц | h_0 , км | h_D , км | L_0 , км | L_D , км | τ_0 , мс | τ_D , мс |
|-------|-------------|------------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------|
| 1 | 16:49 | 6 450 | 5 650 | 5 550 | 208 | 205 | 86 | 83 | 1,3 | 1,5 |
| 2 | 16:55 | 6 450 | 5 550 | 5 650 | 205 | 208 | 83 | 86 | 1,1 | 1,3 |
| 3 | 17:13 | 6 700 | 5 650 | 5 400 | 208 | 201 | 65 | 60 | 1,2 | 0,3 |
| 4 | 17:19 | 6 600 | 5 400 | 5 650 | 197 | 203 | 64 | 72 | 0,4 | 1,1 |
| 5 | 17:43 | 6 400 | 5 650 | 5 150 | 213 | 199 | 92 | 68 | 1,4 | 1,2 |
| 6 | 17:49 | 6 400 | 5 150 | 5 650 | 206 | 220 | 69 | 90 | 0,9 | 1,1 |
| 7 | 18:01 | 6 400 | 5 650 | 4 740 | 220 | 195 | 89 | 64 | 1,3 | 2,1 |
| 8 | 18:07 | 6 400 | 4 740 | 5 650 | 195 | 220 | 64 | 89 | 1,5 | 1,4 |
| 9 | 18:13 | 6 400 | 5 650 | 4 740 | 222 | 195 | 95 | 68 | 1,3 | 1,8 |
| 10 | 18:19 | 6 500 | 4 740 | 5 650 | 201 | 227 | 68 | 90 | 1,4 | 1,3 |
| 11 | 18:31 | 6 450 | 5 650 | 4 380 | 225 | 194 | 72 | 60 | 1,3 | 3,5 |
| 12 | 18:37 | 6 450 | 4 380 | 5 650 | 194 | 225 | 60 | 72 | 1,5 | — |

Таблица 3

| № П/П | t_H , MSK | f_{0F_2} , кГц | f_0 , кГц | f_D , кГц | h_0 , км | h_D , км | L_0 , км | L_D , км | τ_0 , мс | τ_D , мс |
|-------|-------------|------------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------|
| 1 | 18:43 | 6 500 | 5 650 | 5 550 | 237 | 234 | 68 | 63 | 1,3 | 1,3 |
| 2 | 18:49 | 6 500 | 5 550 | 5 650 | 234 | 237 | 63 | 68 | 1,2 | 1,1 |
| 3 | 19:01 | 6 400 | 5 650 | 5 420 | 236 | 230 | 76 | 66 | 1,3 | 0,5 |
| 4 | 19:07 | 6 400 | 5 420 | 5 650 | 230 | 236 | 66 | 76 | 0,8 | 0,7 |
| 5 | 19:25 | 6 300 | 5 630 | 5 170 | 257 | 242 | 102 | 75 | 1,6 | 1,1 |
| 6 | 19:31 | 6 400 | 5 170 | 5 630 | 243 | 257 | 70 | 93 | 1,4 | 0,8 |
| 7 | 19:43 | 6 500 | 5 630 | 4 740 | 247 | 227 | 72 | 52 | 1,4 | 1,8 |
| 8 | 19:49 | 6 300 | 4 740 | 5 630 | 226 | 248 | 57 | 93 | 1,4 | 2,5 |
| 9 | 20:07 | 6 050 | 5 630 | 4 595 | 267 | 232 | 134 | 63 | 2,5 | 2,3 |
| 10 | 20:13 | 6 000 | 4 595 | 5 630 | 237 | 271 | 65 | 128 | 2,8 | 1,5 |
| 11 | 20:25 | 5 900 | 5 630 | 4 395 | 270 | 231 | 146 | 61 | 2,3 | 3,0 |
| 12 | 20:31 | 5 800 | 4 395 | 5 630 | 231 | 276 | 63 | 180 | 2,8 | 1,3 |
| 13 | 22:01 | 4 750 | 4 750 | 4 390 | 291 | 253 | 128 | — | — | — |
| 14 | 22:07 | 4 400 | 4 390 | 4 750 | 275 | — | — | — | — | — |

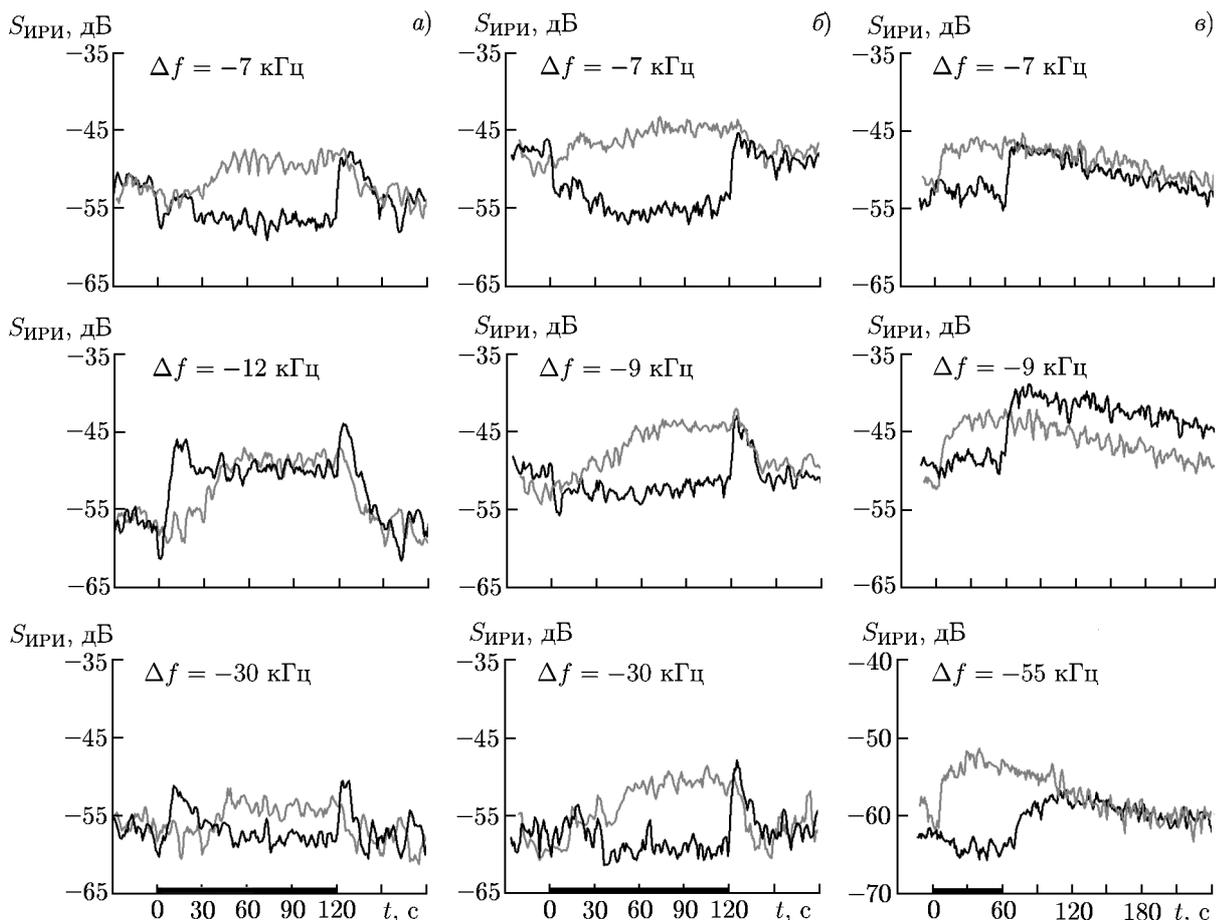


Рис. 2. Осциллограммы искусственного радиоизлучения ионосферы при воздействии нагревной волной (чёрные линии) с частотами $f_0 = 6450$ кГц (а), $f_0 = 4740$ кГц (б) и $f_0 = 4390$ кГц (в) на различных отстройках Δf и диагностической волной (серые линии) с такими же частотами f_d при нагреве на частоте $f_0 = 5650$ кГц (либо $f_0 = 4750$ кГц для $f_d = 4390$ кГц). Панели (а) соответствуют циклу измерений 16:13÷16:25 MSK 24.09.2003, панели (б) — циклу 18:13÷18:25 MSK 24.09.2003, панели (в) — циклу 22:01÷22:13 MSK 25.09.2003. Здесь и далее на оси времени отрезком отмечен интервал нагрева

1.2. Данные дневных измерений (24 сентября 2003 года)

Данные измерений, зарегистрированные в виде комплексных сигналов в полосе 100 кГц, обрабатывались путём построения и анализа динамических спектров излучения в средах «Labview» и «Matlab». Для этого применялись пакеты оригинальных программ, использующих стандартные функции спектрального анализа и усреднения данных. Спектральная плотность мощности комплексных сигналов строилась с частотным разрешением от 100 Гц до 2 кГц, временная выборка для анализа бралась на интервале 10÷27 мс от начала импульса излучения стенда каждую секунду (см. рис. 1).

На рис. 2 приведена динамика отдельных спектральных компонент искусственного радиоизлучения ионосферы на трёх характерных отстройках Δf от частоты волны накачки, отвечающих узкополосной ($\Delta f = -7$ кГц) и широкополосной ($\Delta f = -(30\div 60)$ кГц) компонентам искусственного радиоизлучения ионосферы и его главному спектральному максимуму ($\Delta f = -(9\div 12)$ кГц)

для частот воздействия 6 450 кГц; 4 740 кГц (дневные измерения) и 4 390 кГц (вечерние измерения). Чёрным цветом показаны осциллограммы излучения при использовании волны на данной частоте в качестве нагревной, т. е. при чередовании квазинепрерывного и импульсного диагностического излучения, серым — осциллограммы излучения для чисто диагностического режима при нагреве на частоте $f_0 = 5 650$ кГц ($f_0 = 4 750$ кГц для $f_d = 4 390$ кГц в вечерних наблюдениях). Для дневных измерений время квазинепрерывного нагрева составляло $0 \div 120$ с, вечером — $0 \div 60$ с. При этом разность частот диагностических волн с $f_d = 4 740$ кГц и $f_d = 6 450$ кГц и нагревной волны f_0 была равна $\delta f = f_d - f_0 = -910$ кГц и $+800$ кГц, вечером $\delta f = -360$ кГц.

Хорошо видно, что в центре возмущённой области ионосферы (случай $f_d = f_0$) как для $f_0 = 4 740$ кГц, так и для $f_0 = 6 450$ кГц (чёрные осциллограммы) при включении нагрева практически для всех отстроек Δf интенсивность излучения достигает максимума за короткий промежуток времени (быстрый временной максимум) и затем уменьшается до стационарного уровня. Данное явление получило название overshoot-эффекта и связывается с тем, что развивающиеся во время нагрева неоднородности концентрации плазмы играют роль как источника, так и депрессора искусственного радиоизлучения ионосферы [10, 11]. При выключении нагрева и переходе в режим диагностического зондирования на стадии релаксации искусственных неоднородностей наблюдается обратный overshoot-эффект: образуется второй временной максимум интенсивности излучения уже в диагностическом режиме (релаксация депрессора), и затем излучение спадает вместе с релаксацией источника излучения. Величины прямого и обратного overshoot-эффектов определяются как отношение максимальной интенсивности излучения к её стационарному значению, $S_{ov\alpha} = S_{M\alpha}/S_{ст}$, где $\alpha = 1$ соответствует прямому, $\alpha = 2$ — обратному overshoot-эффекту. Величины $S_{ov\alpha}$, как правило, минимальны в диапазоне главного спектрального максимума искусственного радиоизлучения ионосферы на отстройках $\Delta f_M \approx -(9 \div 12)$ кГц и возрастают как с уменьшением, так и с увеличением Δf .

Характерные времена релаксации диагностического радиоизлучения τ_p после достижения второго временного максимума уменьшаются с ростом отстройки.

При зондировании как верхней, так и нижней части возмущённой области (случай $f_d \neq f_0$) диагностическое радиоизлучение на различных отстройках (серые линии осциллограмм) характеризуется монотонным ростом интенсивности излучения при нагреве, монотонной релаксацией после его выключения и отсутствием видимого overshoot-эффекта. При этом достигаемый к концу нагрева стационарный уровень интенсивности излучения близок к интенсивности второго временного максимума, наблюдаемого при этих частотах воздействия из центра возмущённой области. Времена релаксации излучения после нагрева для различных отстроек в центре возмущённой области и на её периферии также близки между собой для дневных условий наблюдений, однако времена развития искусственного радиоизлучения ионосферы на периферии возмущённой области возрастают по сравнению с аналогичными величинами в центральной части.

Зависимости интегральной интенсивности сигнала искусственного радиоизлучения ионосферы $S_{ИРИ}^J$ в полосе отстроек $|\Delta f| = 5 \div 50$ кГц от времени для различных частот воздействия приведены на рис. 3. Они близки к соответствующим зависимостям для главного спектрального максимума излучения, что не удивительно с учётом резкого степенного характера спада интенсивности излучения на других отстройках. Для малых разностей частот нагревной и диагностической волн $|\delta f| \leq 100$ кГц характер динамики и интенсивность излучения в центре и на периферии возмущённой области близки по своим параметрам. При этом с ростом разности $|\delta f|$ до $300 \div 400$ кГц уменьшаются величины прямого и обратного overshoot-эффектов и возрастают времена развития диагностического излучения на периферии возмущённой области по сравнению с её центром. Как правило, величина обратного overshoot-эффекта S_{ov2} при релаксации плазменных неоднородностей в центре возмущённой области ($f_0 = f_d$) соответствует отноше-

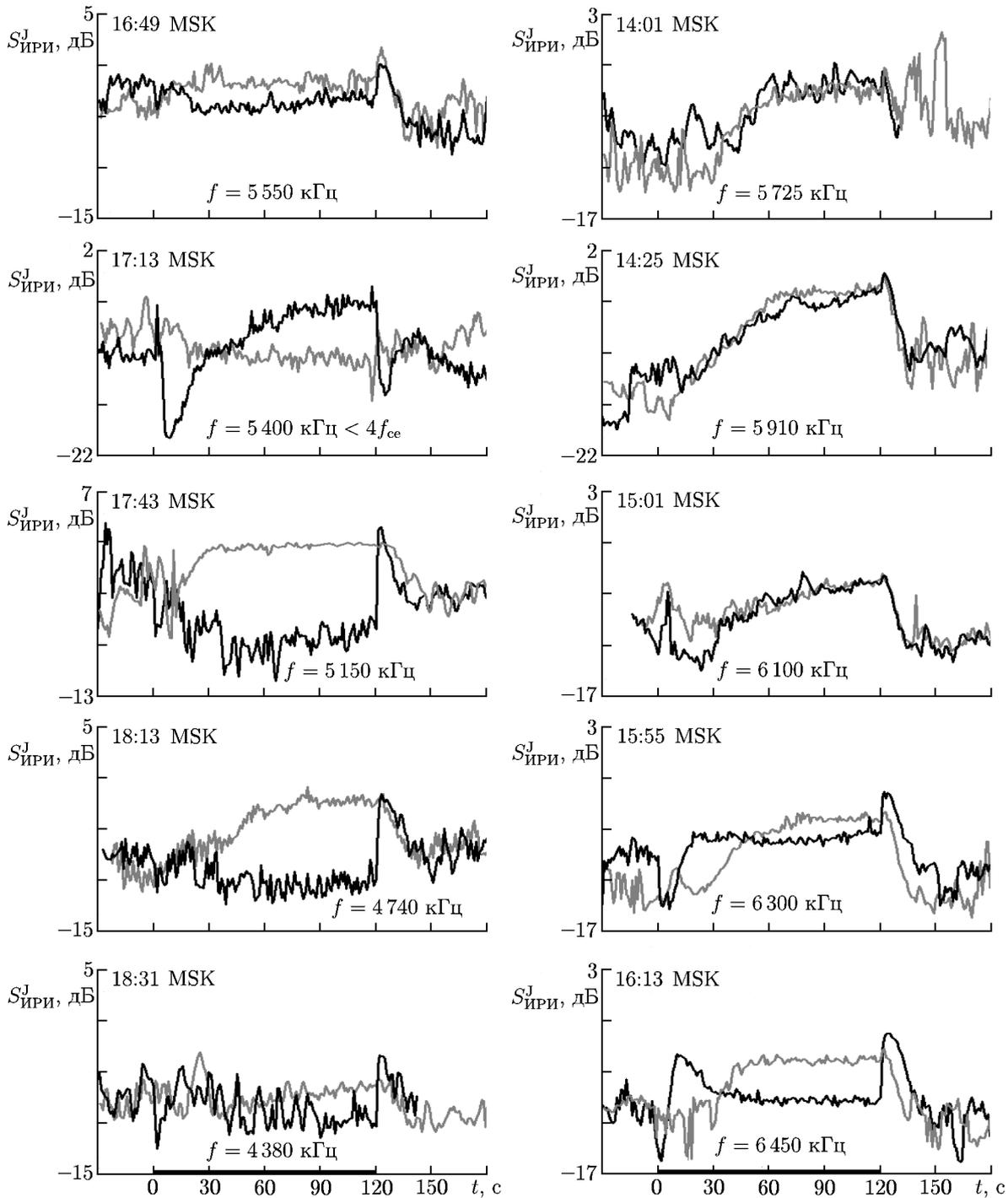


Рис. 3. Осциллограммы интегральной по частоте интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы при воздействии нагревной волной на частотах $f = f_0 \neq 5650$ кГц из центра возмущённой области (чёрные линии) и при зондировании диагностической волной на частотах $f = f_d$ периферии возмущённой области, созданной нагревом на частоте $f_0 = 5650$ кГц (серые линии). Частоты f и время начала цикла измерений указаны на рисунках, каждый цикл (два сеанса) длился 12 мин, измерения 24.09.2003

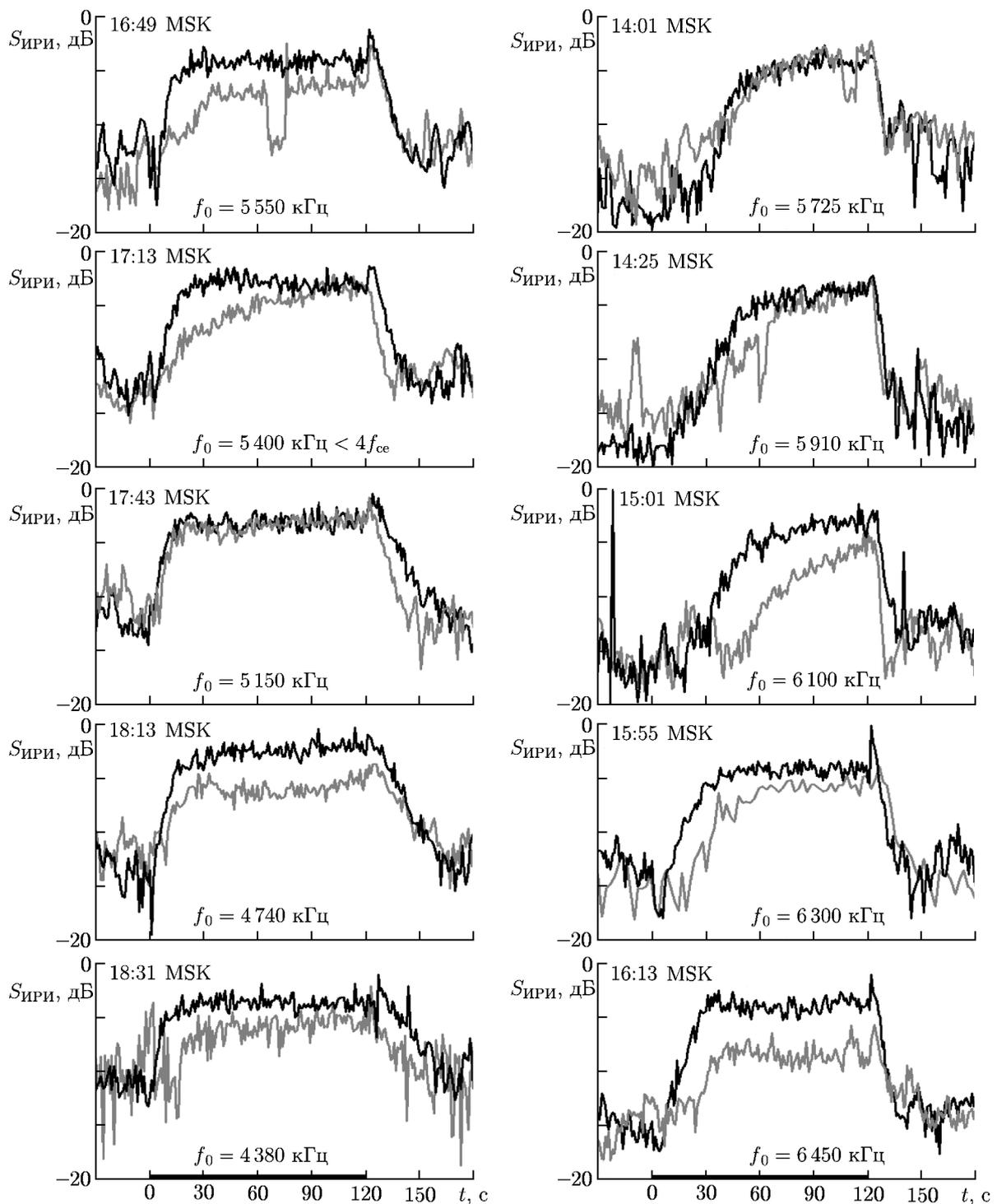


Рис. 4. Осциллограммы искусственного радиоизлучения ионосферы на отстройке $\Delta f_M \approx -13$ кГц при воздействии нагревной волной с частотой $f_0 = 5650$ кГц из центра возмущённой области (чёрные линии) и при зондировании на частоте $f_d = 5650$ кГц периферии возмущённой области, создаваемой нагревом на частотах $f = f_0 \neq 5650$ кГц (серые линии). Частоты f и время начала цикла измерений указаны на рисунках, каждый цикл (два сеанса) длился 12 мин, измерения 24.09.2003. Данные с приёмника «Катран»

нию стационарных интенсивностей излучения, создаваемого нагревной волной на частоте f_0 , и диагностического излучения при зондировании на частотах f_d в интервале $300 < |\delta f| [\text{кГц}] < 800$.

Следует отметить, что используемая частота стэнда 5 400 кГц оказалась близкой к значению четвёртой гармоники электронной гирочастоты $4f_{ce} \approx 5\,430$ кГц; при нагреве в узкой окрестности этой частоты свойства искусственного радиоизлучения ионосферы изменяются существенным образом и требуют отдельного рассмотрения [15]. Детальные исследования динамики диагностического излучения при воздействии вблизи частоты $4f_{ce}$ были выполнены в мае 2004 года, результаты частично опубликованы в [16] и будут далее представлены в отдельной работе. Особенности динамики искусственного радиоизлучения ионосферы при частоте нагрева $f_0 \approx 5f_{ce}$ представлены в [21].

Необходимо обратить внимание и на то, что динамика искусственного радиоизлучения ионосферы на различных частотах из центра возмущённой области сопровождается возрастанием overshoot-эффекта для частот накачки $f_0 \approx 4\,380 \div 5\,150$ кГц ($3f_{ce} < f_0 < 4f_{ce}$) и $f_0 \approx 6\,300 \div 6\,450$ кГц ($4f_{ce} < f_0 \lesssim 5f_{ce}$). В области частот накачки $f_0 \approx 5\,500 \div 6\,100$ кГц ($4f_{ce} < f_0 < 5f_{ce}$) наблюдается максимальная стационарная интенсивность излучения и, соответственно, минимальный overshoot-эффект, что было отмечено в [10, 11, 22].

Динамика искусственного радиоизлучения ионосферы для фиксированной частоты первого передатчика стэнда $f_1 = 5\,650$ кГц исследовалась на фиксированных отстройках в полосе 4 кГц с помощью приёмников «Катран». Это позволило отслеживать суточные вариации излучения, вызываемые изменениями ионосферных условий. На рис. 4 приведены зависимости интенсивности излучения от времени в диапазоне главного спектрального максимума на частоте отстройки $\Delta f_M = -13$ кГц для фиксированной частоты воздействия. Чёрными линиями показаны осциллограммы искусственного радиоизлучения ионосферы, создаваемого нагревной волной с частотой $f_0 = 5\,650$ кГц (из центра возмущённой области), серыми — осциллограммы диагностического излучения, создаваемого волной с частотой $f_d = 5\,650$ кГц при использовании для нагрева волн с различными частотами. На рис. 4 видно ускорение развития искусственного радиоизлучения ионосферы и небольшое увеличение времён релаксации диагностического излучения при переходе к более поздним часам наблюдений.

На рис. 5 представлены спектры излучения в характерные моменты времени. Чёрными линиями показаны спектры радиоизлучения на стационарной стадии, усреднённые на 1÷2 мин нагрева при различных частотах нагревной волны $f_0 \neq 5\,650$ кГц (генерация излучения в центре возмущённой области). Серыми линиями показаны стационарные спектры для различных частот f_d при нагреве на частоте $f_0 = 5\,650$ кГц (генерация диагностического излучения на периферии возмущённой области). Тонкими линиями показаны спектры на стадии второго временного максимума диагностического излучения (обратный overshoot-эффект) во временном интервале $t_M \approx 3 \div 10$ с после перевода нагревной волны с частотой $f_0 \neq 5\,650$ кГц в режим излучения коротких импульсов (генерация диагностического излучения в центре возмущённой области на стадии релаксации ионосферных неоднородностей).

Из рис. 5 видно, что для небольшой разности между частотами волны накачки и диагностической волны $|\delta f| < 100$ кГц стационарные спектры искусственного радиоизлучения ионосферы при непрерывном нагреве и спектры диагностического излучения при импульсном зондировании подобны друг другу. С ростом разности $|\delta f|$ искусственное радиоизлучение ионосферы из центра возмущённой области и с периферии начинает различаться не только по интенсивности, но и по тонкой спектральной структуре. Так, для частот $f_d > 5\,900$ кГц в спектрах диагностического излучения широкополосная компонента (BC) становится всё более интенсивной, тогда как главный спектральный максимум (DM) наблюдается уже как слабый экстремум с постоянной отстройкой $\Delta f_M \approx -10$ кГц, не зависящей от частоты диагностической волны f_d . При этом в центре

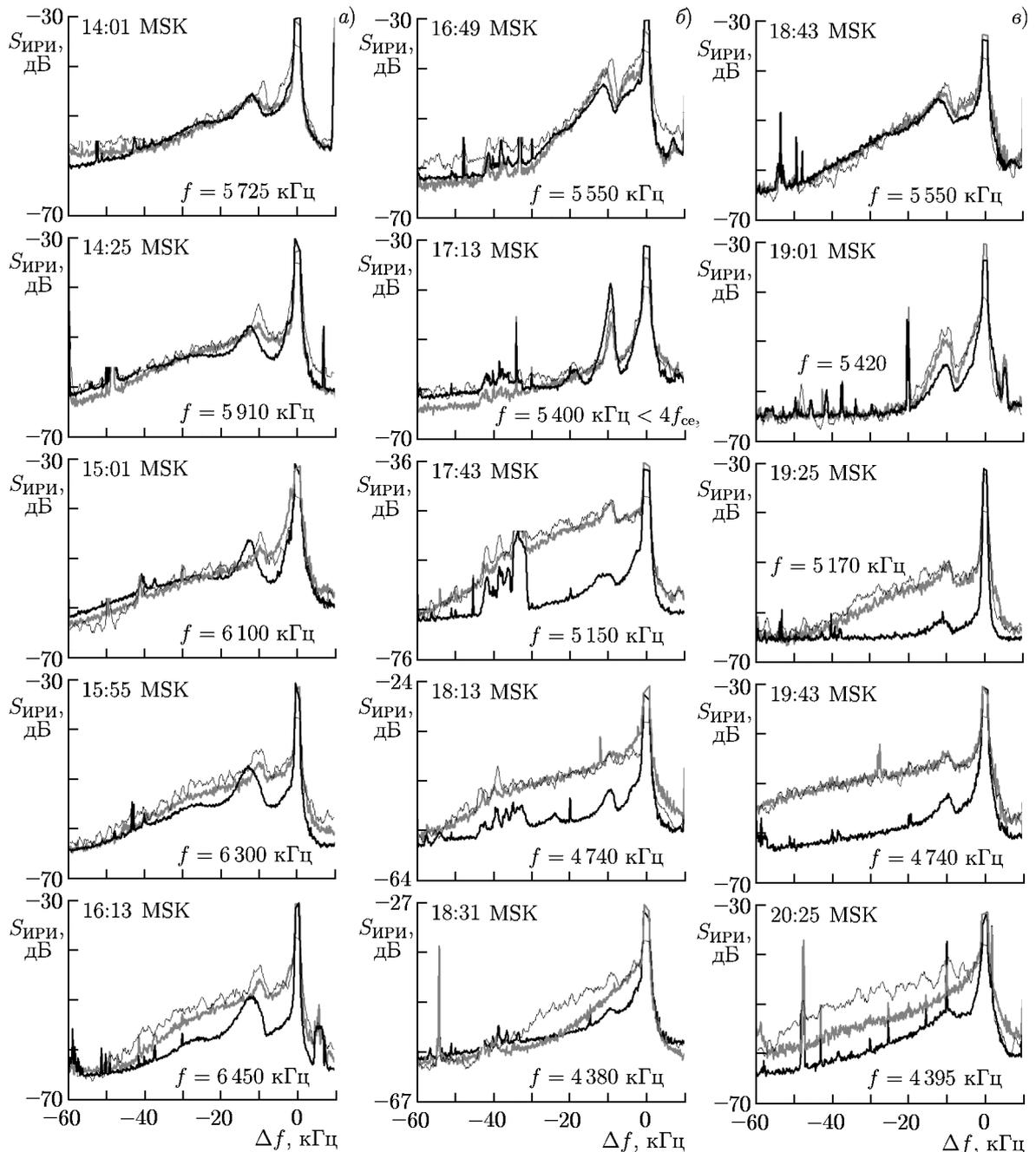


Рис. 5. Стационарные спектры искусственного радиоизлучения ионосферы при нагреве центральной части возмущённой области на частотах $f = f_0 \neq 5650$ кГц (чёрные линии); спектры диагностического излучения на стадии развития временного максимума при зондировании центральной части возмущённой области на стадии её релаксации (тонкие чёрные линии); спектры диагностического излучения при зондировании на частотах f периферии области, создаваемой нагревом на частоте $f_0 = 5650$ кГц (серые линии). Частоты f и время начала цикла измерений указаны на рисунках, каждый цикл (два сеанса) длился 12 мин. Панели (а) и (б) соответствуют 24.09.2003, панели (е) — 25.09.2003

возмущённой области для максимума стационарных спектров искусственного радиоизлучения ионосферы выполняется зависимость $\Delta f_M \approx -2 \cdot 10^{-3} f_0$ [2]. Кроме того, интенсивность излучения

в диапазоне отстроек $|\Delta f| < |\Delta f_M|$ также увеличивается в спектрах диагностического излучения на периферии по сравнению со спектрами из центра возмущённой области. Подобные изменения в спектрах диагностического излучения наблюдаются не только для случая пространственного сдвига между центром возмущённой области и областью генерации диагностического излучения, но и в центре возмущённой области на стадии релаксации диагностического излучения после непрерывного нагрева (во время формирования второго временного максимума излучения).

На рис. 5 также хорошо видно, что спектры диагностического излучения во время формирования второго максимума (тонкие линии) близки по своим свойствам к спектрам диагностического излучения, формирующегося на периферии возмущённой области на стационарной стадии нагрева (серые линии). Для самой большой разности $|\delta f| = 1270$ кГц (для $f = 4380$ кГц) подобие спектров диагностического излучения, генерируемого на стадии релаксации неоднородностей в центре возмущённой области, и спектров диагностического излучения на стационарной стадии нагрева, создаваемых диагностической волной на периферии области, наблюдается позднее после выключения нагрева (после второго временного максимума излучения). Подобное сходство спектров диагностического излучения может свидетельствовать о подобии спектров мелкошабных плазменных неоднородностей при релаксации последних в центре возмущённой области и неоднородностей на периферии возмущённой области на стадии непрерывного воздействия за счёт пространственного уменьшения амплитуды неоднородностей с удалением от центра.

1.3. Данные вечерних измерений (25 сентября 2003 года)

Вечерние измерения были выполнены с 18:43 до 22:20 MSK 25 сентября 2003 года. Ионосферные условия в два дня наблюдений (24 и 25 сентября 2003 года) по данным ионограмм были близкими, а время начала измерений 25 сентября практически совпадает с временем окончания наблюдений 24 сентября (18:43 MSK). Программа эксперимента 25 сентября совпадала с программой 24 сентября за исключением двух отличий. Во-первых, в условиях вечернего уменьшения критических частот F -слоя в эксперименте исследовалась пространственно-временная динамика искусственного радиоизлучения ионосферы только из центральной и нижней частей возмущённой области (см. табл. 3). Во-вторых, нагрев был сокращён с 2 до 1 мин в связи с более быстрым развитием искусственного радиоизлучения ионосферы в вечерних условиях. Ускоренное развитие излучения связывается с тем, что уменьшается регулярное поглощение радиоволн в нижней ионосфере, исчезает влияние искусственной дефокусирующей линзы [23] и, как следствие, увеличивается эффективная мощность нагрева F -области ионосферы в вечерние и ночные часы.

Осциллограммы интегральной по частотам интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы для шести различных частот нагревной волны $f_0 < 5650$ кГц представлены на рис. 6а. В целом динамика излучения качественно повторяет картину дневных наблюдений при зондировании нижней части возмущённой области. В то же время, вечером наблюдается дальнейшее ускорение развития диагностического излучения и замедление его релаксации после нагрева. Аналогичная тенденция наблюдается и для излучения, генерируемого нагревной волной с частотой $f_0 = 5630 \div 5650$ кГц, для которой, однако, времена релаксации диагностического излучения в вечерние часы возрастают гораздо существеннее (см. рис. 6б). Подобное замедление релаксации диагностического излучения при переходе от дневных к ночным измерениям отмечалось в целом ряде работ [8, 10, 11, 13, 16, 24]. В исследовании [25] было экспериментально установлено, что вечером в центральной части возмущённой области одновременно возрастают времена релаксации диагностического излучения и искусственных неоднородностей с поперечными к геомагнитному полю размерами порядка длины волны накачки. Для наших экспериментов показательно то, что в вечерних измерениях времена релаксации для центральной части возмущённой области и её

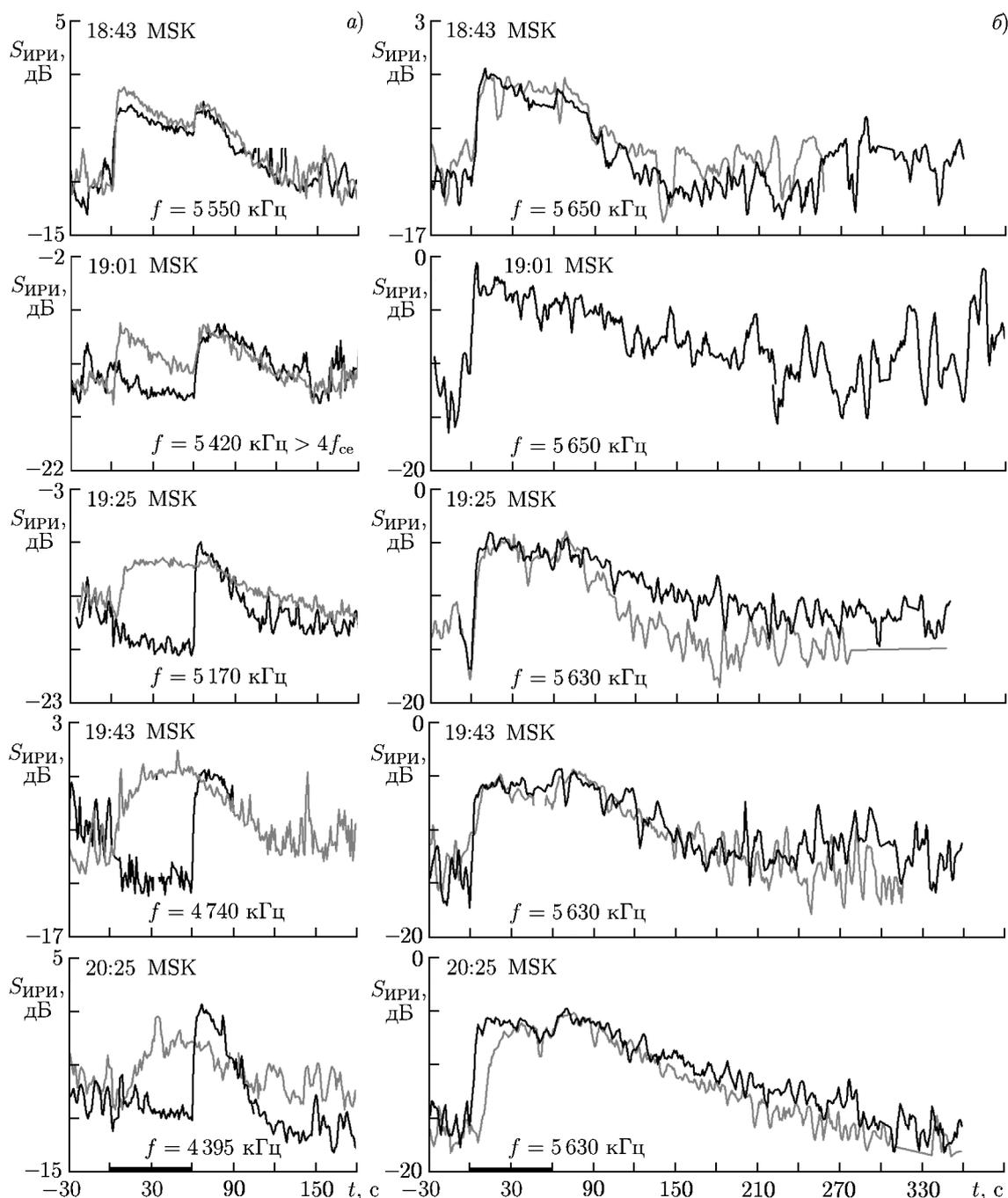


Рис. 6. Панели (а) — осциллограммы интегральной по частотам интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы из центра возмущённой области (чёрные линии) при воздействии нагревными волнами с частотой $f_0 < 5650$ кГц и при зондировании нижней части возмущённой области диагностическими волнами с частотами $f_d < 5650$ кГц, когда нагрев проводился на частотах $f_0 = 5650$ или 5630 кГц (серые линии). Панели (б) — осциллограммы интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы при воздействии нагревной волной с частотой $f_0 = 5650$ или 5630 кГц (чёрные линии) и при зондировании верхней части возмущённой области диагностической волной с частотами $f_d = 5650$ или 5630 кГц, когда нагрев проводился на частотах $f_0 < 5650$ кГц (серые линии). Время нагрева $0 \div 60$ с. Частоты f и время начала цикла измерений указаны на рисунках, каждый цикл (два сеанса) длился 12 мин. Данные вечерних наблюдений 25 сентября 2003 года

верхнего и нижнего краёв могут существенно различаться, причём более длительная релаксация имеет место для больших высот и частот зондирования, приближающихся к критическим частотам F -слоя (см. табл. 3).

Набор спектров искусственного радиоизлучения ионосферы для вечерних наблюдений представлен на рис. 5в. Качественно они подобны дневным данным. Вечерние измерения для частоты $f = 5420$ кГц соответствовали случаю работы выше четвёртой гармоники гирочастоты ($4f_{ce} \approx \approx 5370 \div 5380$ кГц). После 20:40 MSK частота передатчика 5630 кГц превысила критическую частоту F -слоя и была уменьшена сначала до 5200 кГц, а затем до 4750 кГц. Зависимость динамики искусственного радиоизлучения ионосферы от частоты отстройки для самых поздних сеансов наблюдений в 22:01÷22:13 MSK представлена для частоты воздействия $f = 4390$ кГц на рис. 2в. При нагреве на этой частоте наблюдается интенсивный обратный overshoot-эффект в динамике излучения (чёрные осциллограммы). При этом overshoot-эффект уже отсутствует в развитии и релаксации диагностического излучения для частоты $f_d = 4390$ кГц при нагреве на частоте $f_0 = 4750$ кГц и разности $\delta f = f_d - f_0 = -360$ кГц (серые осциллограммы). Из рис. 2в также видно, что как для центра возмущённой области, так и для её нижнего края времена релаксации диагностического излучения для ночных часов наблюдений принимают свои максимальные значения 130÷145 с для всех отстроек. Благодаря этому видно, что время t_m достижения второго временного максимума на стадии релаксации излучения возрастает в 3÷4 раза (от $t_m \approx \approx 10 \div 15$ с до $t_m \approx 45 \div 50$ с) с увеличением отстройки в спектре диагностического излучения, что не отмечалось в дневных измерениях.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выполненные измерения динамических характеристик искусственного радиоизлучения ионосферы позволяют проанализировать эволюцию высокочастотных плазменных волн и низкочастотных флуктуаций концентрации плазмы практически во всём объёме возмущённой области ионосферы. Разность частот воздействия в измерениях составляла $|\delta f| = 1270$ кГц, а соответствующая разность высот центра и периферии возмущённой области достигала 45 км для вечерних наблюдений (см. табл. 3).

Декременты затухания γ различных плазменных волн, ответственных за генерацию искусственного радиоизлучения ионосферы, определяют времена релаксации $\tau = \gamma^{-1}$ различных компонент излучения. Эти времена позволяют судить о диссипации высокочастотных турбулентностей — ленгмюровской и верхнегибридной. Результаты измерений декрементов затухания приведены на рис. 7. Анализ данных показал следующее. При зондировании короткими импульсами невозмущённой ионосферы (до нагрева) времена релаксации узкополосной компоненты излучения, связанной с возбуждением ленгмюровской турбулентности в результате развития стрикционной параметрической неустойчивости, близки к характерным временам столкновительного затухания: $\tau_{NC} \approx 2,8 \div 4,4$ мс с декрементами $\gamma_{NC} \approx 230 \div 350$ с⁻¹ $\approx \nu_{ei}$ для высот $z > 200$ км. Частота электронно-ионных соударений ν_{ei} вычислялась по формуле [26]:

$$\nu_{ei} = 5,5 N_e \ln(220 T_e / N_e^{1/3}) / T_e^{3/2}, \quad (1)$$

где N_e — концентрация электронов, а температура электронов T_e оценивалась из модели IRI 2007 [27]. На высотах F -области ионосферы частота электронных столкновений $\nu_e \approx \nu_{ei}$. Таким образом, измерения времён релаксации стрикционной узкополосной компоненты искусственного радиоизлучения ионосферы могут использоваться для определения и мониторинга частоты электронных столкновений ν_e в F -области ионосферы.

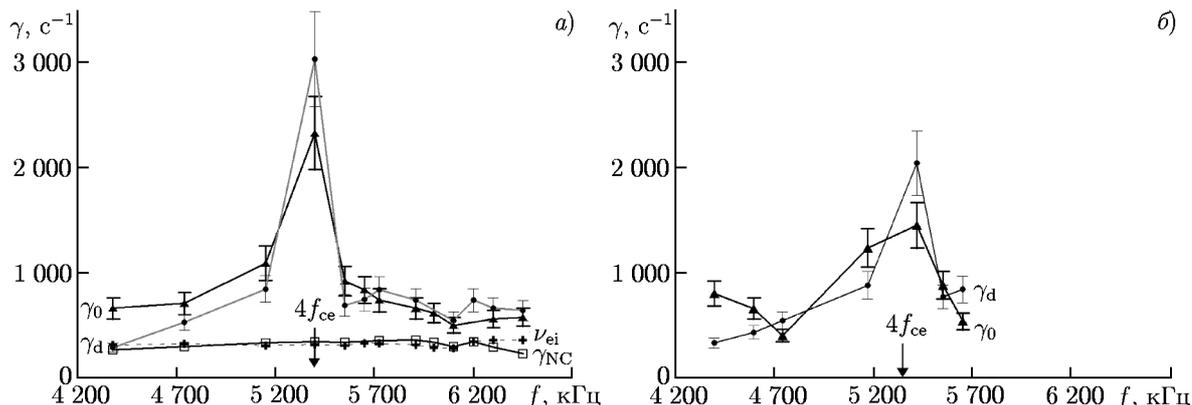


Рис. 7. Зависимость декрементов затухания верхнегибридных компонент искусственного радиоизлучения ионосферы (надпись γ_0 и символы \blacktriangle), диагностического излучения (γ_d , \bullet), ленгмюровской компоненты диагностического излучения (γ_{NC} , \square) и расчётной частоты электронно-ионных столкновений (ν_{ei} , $+$) от частоты f волны накачки и диагностической волны (высоты возмущённой области см. в табл. 1–3). Панель (а) соответствует измерениям 14:00÷18:45 MSK 24.09.2003, панель (б) — 18:30÷20:45 MSK 25.09.2003

Одновременное квазинепрерывное и диагностическое воздействие на разных частотах позволило получить декременты затухания высокочастотной верхнегибридной турбулентности на различных высотах возмущённой области ионосферы. Исходные данные о временах релаксации излучения τ_0 и τ_d приведены в табл. 1–3, декременты затухания приведены на рис. 7. Декременты затухания верхнегибридных компонент искусственного радиоизлучения ионосферы и диагностического излучения оказываются близки для случая $f_0 \approx f_d$ и практически всегда превышают столкновительные значения γ_{NC} . Декременты принимают минимальные значения при воздействии на частотах, сильно отличающихся от гармоник $4f_{ce}$, и максимальные ($\gamma \approx 1800 \text{ с}^{-1}$) в диапазоне $f_0 \approx f_d \approx 4f_{ce}$. В предыдущих экспериментах [6, 20, 28] возрастание бесстолкновительной части декремента затухания при нагреве вблизи гармоник гирочастоты $5f_{ce}$ и $7f_e$ достигало значений $\gamma - \nu_e \approx (4 \div 20)\nu_e$.

Следует отметить, что при нагреве на частотах вдали от четвёртой гармоник гирочастоты наблюдается максимальная разность в декрементах затухания плазменных волн, генерируемых в центре возмущённой области и на её периферии. Максимально эти декременты отличались в 2÷2,5 раза (см. табл. 3 и рис. 7) в вечерние часы наблюдений. Обнаруженные зависимости могут свидетельствовать о существенной роли бесстолкновительного затухания плазменных волн при нагреве вблизи гармоник гирочастоты [29] и в центральной части возмущённой области по сравнению с её периферией. Для фиксированной частоты воздействия $f_0 = f_d = 5650 \text{ кГц}$ при переходе от дня к ночи декременты затухания уменьшаются от $\gamma \approx 1000 \text{ с}^{-1}$ до $\gamma \approx 350 \text{ с}^{-1}$ (см. табл. 1–3). Подобное уменьшение может быть связано либо с ростом высоты возмущённой области к вечеру (возрастает разность $|f_0 - 4f_{ce}|$, поскольку частота $4f_{ce}$ убывает с высотой со скоростью $2,4 \text{ кГц/км}$), либо с уменьшением концентрации надтепловых электронов (фотоэлектронов), вносящих существенный вклад в бесстолкновительное затухание [12].

Проведённые измерения выявили, что стационарная интенсивность диагностического излучения при одновременном зондировании на различных частотах f_d во время непрерывного нагрева изменяется в пространстве подобно тому, как изменяется во времени интенсивность искусственного излучения при переходе от стационарной стадии нагрева к стадии зондирования релаксирующей возмущённой области. На рис. 8а приведены результаты обработки данных измерений, представленных на рис. 3, 6а. Здесь $\Delta S_{ст} = S_{ст}^d / S_{ст}^0$, $S_{ст}^d$ — стационарная интенсивность

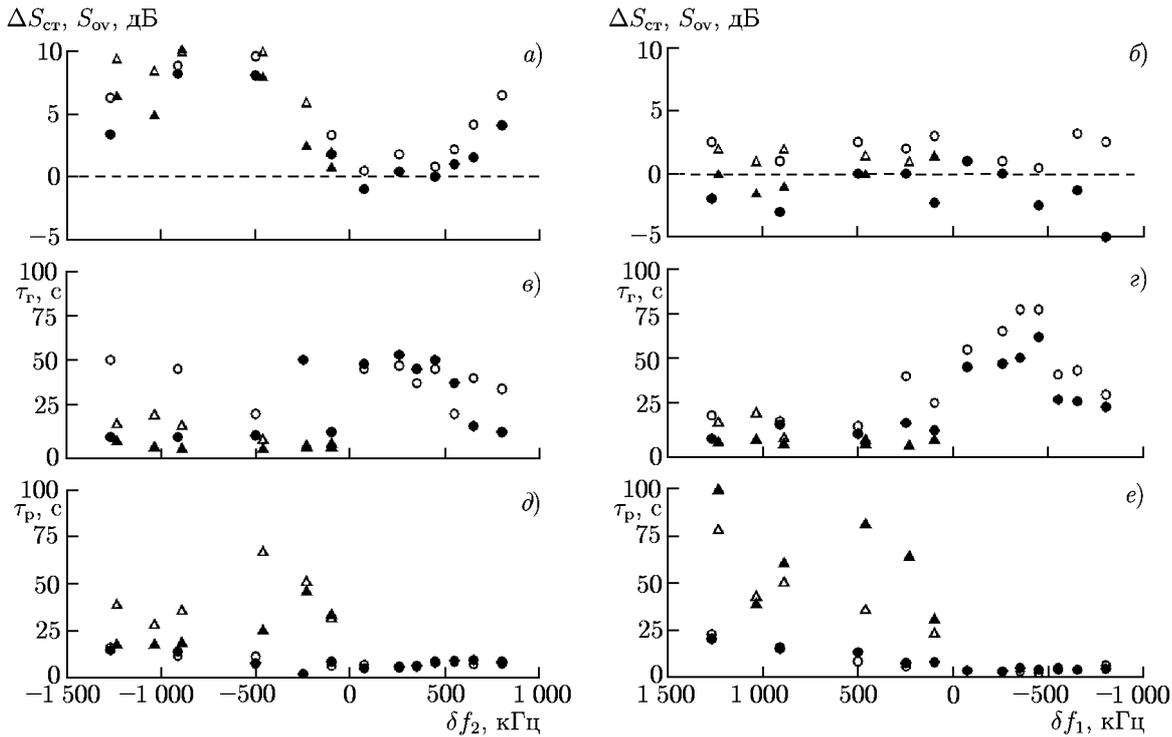


Рис. 8. Панели (а), (б) — отношение интенсивностей стационарного уровня излучения при диагностическом зондировании и нагреве $\Delta S_{ct} = S_{ct}^n / S_{ct}^0$ (чёрные символы) и величина обратного overshoot-эффекта S_{ov} (белые символы). Панели (с), (д) — характерные времена развития излучения при нагреве в центре возмущённой области (чёрные символы, $f = f_0$) и диагностическом зондировании на периферии области (белые символы, $f \neq f_0$). Панели (е), (ф) — характерные времена релаксации диагностического излучения в центре возмущённой области (чёрные символы, $f = f_0$) и на её периферии (белые символы, $f \neq f_0$). Данные дневных измерений представлены кружками, вечерних — треугольниками. Отстройки частот первого и второго передатчиков $\delta f_1 = f_2 - f_1$, $\delta f_2 = f_1 - f_2$ при $f_1 = 5\,650$ либо $5\,630$ кГц. Панели (а), (с), (д) представляют обработку данных рис. 3 и 6а, панели (б), (д), (е) — данных рис. 4 и 6б

диагностического излучения, генерируемого диагностической волной с частотой $f_d \neq 5\,650$ кГц при нагреве волной с частотой $f_0 = 5\,650$ кГц, S_{ct}^0 — стационарная интенсивность излучения, генерируемого нагревной волной с частотой $f_0 = f_d$, $S_{ov} = S_{M2} / S_{ct}^0$ — величина обратного overshoot-эффекта или отношение максимальной интенсивности диагностического излучения на стадии релаксации возмущённой области к стационарной интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы при условии $f_0 = f_d$. Величина ΔS_{ct} показана на рис. 8 чёрными символами, величина S_{ov} — белыми.

Из рис. 8 видно следующее. При малых разностях $|\delta f| = |f_d - f_0|$, когда излучение генерируется близко к центру возмущённой области, интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы и диагностического излучения близки друг другу как при пространственном (частотном) разnose областей генерации, так и при переводе нагревной волны из квазинепрерывного режима в режим коротких импульсов: $\Delta S_{ct} \approx S_{ov} \approx \pm 2$ дБ при $|\delta f| < 200$ кГц. С ростом разности $|\delta f|$ отношение стационарных интенсивностей диагностического излучения и искусственного радиоизлучения ионосферы возрастает до $\Delta S_{ct} \approx 5 \div 10$ дБ и по-прежнему практически совпадает с величиной обратного overshoot-эффекта S_{ov} . Наибольшие значения ΔS_{ct} и S_{ov} порядка $5 \div 10$ дБ наблюдаются в области частот воздействия $4,4 \div 5,2$ МГц. Величины ΔS_{ct} и S_{ov} также возрастают до $4 \div 6$ дБ для максимальной используемой частоты $6,45$ МГц.

Уменьшение стационарной интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы из центра возмущённой области по сравнению с периферией является следствием аномального ослабления (депрессии) излучения в условиях развития интенсивных мелкомасштабных неоднородностей концентрации плазмы. При пространственном затухании депрессора диагностического излучения с удалением от центра возмущённой области (при увеличении разности частот δf), а также при временной релаксации ионосферных неоднородностей наблюдается усиление интенсивности диагностического излучения, связанное с уменьшением его аномального ослабления.

Для фиксированной частоты воздействия $f_0 = f_d = 5650$ кГц из рис. 8б (обработка данных рис. 4 и 6б) видно, что величина обратного overshoot-эффекта имеет малую положительную величину ($S_{ov} < 3$ дБ), а отношение стационарных интенсивностей излучений меньше 1 (до $\Delta S_{ст} \approx -3$ дБ). Слабость эффектов подавления излучения на этой частоте может определять и максимальную стационарную интенсивность искусственного радиоизлучения ионосферы, наблюдаемую в этом диапазоне частот волны нагрева по сравнению с другими частотами воздействия [22].

Количественные оценки связи характеристик искусственного радиоизлучения ионосферы и искусственных неоднородностей будут сделаны во второй части работы в рамках модели двойной трансформации [17–19, 30]. Однако на основе приведённых данных измерений диагностического излучения и существующих представлений о характерных параметрах искусственных мелкомасштабных ионосферных неоднородностей [9] можно сделать некоторые качественные выводы о пространственно-временных изменениях спектра неоднородностей различных масштабов. Исследования показали идентичность спектров и близкие интенсивности диагностического излучения, генерируемого при сдвиге области его возбуждения на $15 \div 20$ км по высоте от центра возмущённой области, и спектров и интенсивности диагностического излучения, генерируемого на стадии временного максимума излучения при релаксации неоднородностей через время $t_m \approx 5 \div 10$ с после окончания нагрева (см. рис. 5). Идентичность спектров диагностического излучения указывает на идентичность спектров искусственных неоднородностей плазмы для этих случаев. Поскольку времена $t < t_m$ отвечают временам релаксации метровых неоднородностей ($l_{\perp} \approx 1 \div 10$ м), форма спектра неоднородностей на стадии зондирования $t \geq t_m$ определяется декаметровыми неоднородностями ($l_{\perp} \approx 10 \div 100$ м), релаксирующими более медленно [9, 25]. Соответственно, такие декаметровые неоднородности должны определять интенсивность и форму спектра диагностического излучения на периферии возмущённой области. При этом неоднородности с метровыми масштабами должны быть вытянуты вдоль магнитного поля от центра возмущённой области не более чем на $15 \div 20$ км — на расстояние их пространственного ослабления.

Измерения времён развития искусственного радиоизлучения ионосферы при нагреве и времён релаксации диагностического излучения при последующем зондировании дают информацию о временах развития и релаксации низкочастотной турбулентности на различных высотах возмущённой области. На рис. 8в приведены результаты измерений характерных времён развития τ_r искусственного радиоизлучения ионосферы и диагностического излучения, полученные из данных рис. 3 и 6а. Максимальные времена развития диагностического излучения до $\tau_r \approx 50$ с наблюдались в дневных измерениях на краю возмущённой области и могли максимально в 10 раз превышать времена развития искусственного радиоизлучения ионосферы в центре области. На рис. 8г (обработка данных рис. 4 и 6б) также хорошо видны суточные вариации времён развития излучения в центре возмущённой области для частоты $f_0 = 5650$ кГц: времена τ_r уменьшаются от $50 \div 75$ с до $3 \div 5$ с при переходе от дневных к вечерним наблюдениям. Зависимости на рис. 8в и г свидетельствуют об ускоренном развитии искусственных неоднородностей концентрации плазмы в центре возмущённой области по сравнению с её периферией, а также для вечерних условий наблюдений по сравнению с дневными. Рост времён развития неоднородностей (на периферии

возмущённой области по сравнению с её центром) может определяться как замедлением распространения возмущений температуры и концентрации плазмы из центральной области нагрева, так и ростом характерного пространственного масштаба этих возмущений (от единиц до десятков метров), имеющих, соответственно, и бóльшие времена развития (см., например, [9]). Уменьшение времён развития диагностического излучения и плазменных неоднородностей вечером можно связывать с ростом эффективной мощности излучения нагревного стенда при вечернем уменьшении поглощения в D - и E -слоях ионосферы.

Исследование эволюции диагностического излучения при переходе от нагрева к диагностическому зондированию возмущённой плазмы даёт информацию о временах релаксации искусственных неоднородностей плазмы и позволяет оценивать пространственные масштабы неоднородностей, ответственных за генерацию излучения. На рис. 8*д* приведены результаты измерений характерных времён релаксации диагностического излучения после достижения временного максимума излучения по данным рис. 3 и 6*а*. Для дневных измерений времена релаксации возмущённой области как целого лежат в пределах $\tau_p \approx 5 \div 15$ с, слабо зависят от области генерации излучения (центр или периферия) и слегка увеличиваются к более поздним часам наблюдений. Суточный ход времён релаксации хорошо просматривается для фиксированной частоты $f_0 = 5650$ кГц, для которой в дневных измерениях времена плавно увеличиваются от $\tau_p \approx 5$ с до $\tau_p \approx 20$ с, а начиная с 18:00 и до 20:30 MSK существенно увеличиваются от $\tau_p \approx 20$ с до $\tau_p \approx 100$ с (рис. 8*е*). На фоне монотонного роста времён релаксации наблюдались локальные максимальные значения τ_p при локальном увеличении высоты отражения нагревной (диагностической) волны и уменьшении критической частоты f_{oF_2} в 19:25÷19:35 MSK (см. табл. 3 и рис. 8*д*, *е*). С другой стороны, в вечерних условиях с уменьшением частоты нагрева от $f_0 = 5,55$ МГц до $f_0 = 4,4$ МГц и удалением от критических частот F -слоя при практически постоянной высоте центра возмущённой области $h \approx 230$ км времена релаксации диагностического излучения уменьшаются от $\tau_p \approx 50$ с до $\tau_p \approx 18$ с. Однако для самых поздних часов наблюдений около 22:00 MSK с уменьшением критической частоты f_{oF_2} и ростом высот отражения (см. табл. 3) времена релаксации достигали максимальных значений $\tau_p \approx 130 \div 145$ с и для наименьшей используемой частоты воздействия 4390 кГц.

Самым удивительным оказалось существенное различие (до 2÷3 раз) времён релаксации диагностического излучения в центре и на периферии возмущённой области в вечерних измерениях (см. рис. 6, сеансы для частот 5170 и 4395 кГц, а также рис. 8*д*, *е*). Как правило, при нагреве на частоте $f_0 = 5650$ кГц $> f_d$, когда наблюдались максимальные значения τ_p , времена релаксации на нижних частотах зондирования всегда превышали времена релаксации при нагреве на этих же частотах. Напротив, времена релаксации для диагностической волны $f_d = 5650$ кГц $> f_0$ могли несколько уменьшаться, но всегда превосходили времена релаксации в центре возмущённой области, расположенном ниже. В обоих случаях время жизни плазменных неоднородностей возрастало на больших высотах, независимо от высоты источника их генерации. В одновременных измерениях динамики искусственного радиоизлучения ионосферы и искусственных неоднородностей [25] была показана однозначная взаимосвязь вечернего роста времён релаксации интенсивности диагностического излучения и неоднородностей с поперечными к геомагнитному полю размерами порядка длины волны накачки (50÷75 м). Подобный вечерний рост времён релаксации $\tau_p = l_{||}^2 / (8D_{a||})$ (формула (8) из [25], где $D_{a||}$ — коэффициент продольной амбиполярной диффузии) связывается с увеличением вытянутости (продольного масштаба $l_{||}$) этих неоднородностей при переходе к ночному времени, даже при возможном росте значений $D_{a||}$ с высотой [31]. В таком случае проведённые измерения показывают, что вытянутость плазменных неоднородностей может зависеть от используемой частоты волны нагрева и возрастет при приближении высоты её отражения к максимуму F -слоя.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования показывают широкие возможности новой цифровой техники регистрации и анализа широкополосных сигналов для диагностики ионосферной турбулентности. Использование широкополосного приёма позволило перейти от регистрации динамики диагностического искусственного радиоизлучения ионосферы на фиксированных частотах к полному спектральному анализу сигналов.

Показано, что форма спектра диагностического излучения определяется свойствами высокочастотных верхнегибридных плазменных волн, а интенсивность и медленная динамика излучения зависят от эволюции спектра мелкомасштабных искусственных неоднородностей. Широкополосный приём искусственного радиоизлучения ионосферы позволяет оперативно следить за динамическими параметрами спектров высокочастотной плазменной турбулентности различного типа и определять частоты соударений в ионосферной плазме. Обнаружено заметное (до $2 \div 2,5$ раз) превышение декрементов затухания верхнегибридных плазменных волн в центральной части возмущённой области по сравнению с её периферией. При нагреве волнами с частотами в достаточно широкой полосе (до 600 кГц) около гармоник электронной гирочастоты также обнаружено превышение декрементов над их столкновительными значениями. При нагреве вблизи гармоник гирочастоты такое превышение может достигать 10–20 раз; оно связывается с бесстолкновительным затуханием плазменных волн на ускоряемых плазменной турбулентностью электронах.

Получены первые результаты об идентичности интенсивности и формы спектров диагностического излучения на стадии зондирования периферии возмущённой области во время нагрева и на стадии релаксации неоднородностей в её центре. Эти результаты свидетельствуют об эквивалентности влияния пространственного ослабления и временной релаксации искусственных неоднородностей с метровыми масштабами на процесс генерации излучения. Ослабление этих неоднородностей увеличивает интегральную по частоте интенсивность диагностического излучения с удалением от центра возмущённой области во время нагрева, либо в центре возмущённой области на стадии зондирования после нагрева. Измерения показали, что области максимального подавления интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы отвечают частотам воздействия $f = 4,4 \div 5,2$ МГц $< 4f_{ce}$ и $f = 6,3 \div 6,45$ МГц $< 5f_{ce}$. Области частот $f = 5,6 \div 5,9$ МГц, отвечающие максимальной интенсивности излучения, характеризуются слабым overshoot-эффектом в динамике излучения, что согласуется с исследованиями [22]. Обнаруженная частотная зависимость эффектов подавления генерации искусственного радиоизлучения ионосферы и вопрос её связи с амплитудой и формой спектра искусственных неоднородностей требуют дальнейшего тщательного изучения, в том числе измерения аномального ослабления пробных волн и ракурсного рассеяния радиоволн в широкой полосе частот.

Установлено, что времена генерации диагностического излучения уменьшаются максимально в 10 раз как с уменьшением разности частот $|\delta f| = |f_d - f_0|$ в центре возмущённой области по сравнению с её периферией, так и при переходе от дневных условий наблюдений к вечерним. По измерениям времён медленной релаксации диагностического излучения после выключения нагрева получены новые данные о характере релаксации низкочастотных возмущений плазмы на различных высотах, замедляющейся максимально в $10 \div 20$ раз вблизи максимума F -слоя в условиях вечерних измерений.

Для определения более детальных характеристик спектра искусственных неоднородностей на различных высотах возмущённой области во второй части работы будут представлены результаты численного моделирования динамики широкополосной компоненты излучения [30] на основе физической модели её генерации [17], 3-мерной динамической модели спектра мелкомасштабных неоднородностей [9], модифицированной с учётом новых экспериментальных данных, и изме-

рений искусственного радиоизлучения ионосферы. Важно подчеркнуть, что в настоящее время подобная комплексная диагностика свойств верхнегибридной турбулентности в экспериментах по активному воздействию на ионосферную плазму проводится только с помощью измерений характеристик искусственного радиоизлучения. В то же время следует отметить, что в проведённых измерениях эффективная мощность воздействия была невелика (порядка 20 МВт как для нагревной, так и диагностической волн), однако достаточна, чтобы возбудить искусственную ионосферную турбулентность. При увеличении эффективной мощности до уровня, например, стенда HAARP (до 3,6 ГВт) возможны как заметные изменения спектров и амплитуд плазменных волн и мелкомасштабных неоднородностей, так и физических процессов, проходящих в возмущённой области (например, существенная дополнительная ионизация ионосферной плазмы [32] и изменение характера конкуренции верхнегибридной и ленгмюровской турбулентности). Выполненные авторами в марте 2011 года на стенде HAARP исследования, аналогичные измерениям на стенде «Сура», помогут прояснить данные вопросы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11-02-00125, 12-02-00513 и 13-02-12074-офи-м), Министерства образования и науки РФ (госконтракт 14.518.11.7056) и в соответствии с Программой развития Нижегородского госуниверситета им. Н. И. Лобачевского как национального исследовательского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thide B., Kopka H., Stubbe P. // *Phys. Rev. Lett.* 1982. V. 49. P. 1 561.
2. Stubbe P., Kopka H., Thide B., Derblom H. // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 7 523.
3. Perkins F. W., Oberman C. R., Valeo E. J. // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79, No. 10. P. 1 478.
4. Грач С. М., Караштин А. Н., Митяков Н. А. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1977. Т. 20, № 12. С. 1 827.
5. Васьков В. В., Гуревич А. В. // *ЖЭТФ.* 1977. Т. 73. С. 929.
6. Sergeev E. N., Frolov V. L., Komrakov G. P., et al. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1997. V. 59, No. 18. P. 2 263.
7. Thide B., Djuth F. T., Leyser T. B., Ierkic H. M. // *J. Geophys. Res. A.* 1995. V. 100, No. 12. P. 23 887.
8. Сергеев Е. Н., Фролов В. Л., Бойко Г. Н., Комраков Г. П. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1998. Т. 41, № 3. С. 313.
9. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Metelev S. A., Sergeev E. N. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. V. 59. P. 2 317.
10. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Комраков Г. П. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1999. Т. 42, № 7. С. 619.
11. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Комраков Г. П. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1999. Т. 42, № 8. С. 810.
12. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Котов П. В. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2004. Т. 47, № 3. С. 209.
13. Фролов В. Л., Бойко Г. Н., Метелёв С. А., Сергеев Е. Н. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1994. Т. 37, № 7. С. 909.
14. Frolov V. L., Sergeev E. N., Komrakov G. P., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 2004. V. 109, No. 7. Art. no. A07304.
15. Leyser T. B. // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 98, No. 3–4. P. 223.
16. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Котов П. В. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2007. Т. 50, № 8. С. 649.

17. Грач С. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 6. С. 684.
18. Шварц М. М., Грач С. М., Сергеев Е. Н., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 5. С. 647.
19. Grach S. M., Shvarts M. M., Sergeev E. N., Frolov V. L. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1998. V. 60, No. 12. P. 1233.
20. Сергеев Е. Н., Бойко Г. Н., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 6. С. 763.
21. Norin L., Grach S. M., Leyser T. B., et al. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. no. A09314.
22. Sergeev E. N., Frolov V. L., Grach S. M., Kotov P. V. // J. Adv. Space Res. 2006. V. 38, No. 11. P. 2518.
23. Бойко Г. Н., Васьков В. В., Голян С. Ф. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 8. С. 960.
24. Фролов В. Л., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 51, № 4. С. 273.
25. Сергеев Е. Н., Зыков Е. Ю., Акчурин А. Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 79.
26. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967.
27. http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri_vitmo.php.
28. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Тиде Б. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 3. С. 214.
29. Бареев Д. Д., Гавриленко В. Г., Грач С. М., Сергеев Е. Н. // Вестник ННГУ. Радиофизика. 2011. № 5 (3). С. 160.
30. Сергеев Е. Н., Грач С. М. // Труды XXIII Всеросс. конф. по распространению радиоволн, Йошкар-Ола, 2011. Т. 2. С. 261.
31. Блаунштейн Н. Ш., Ерухимов Л. М., Урядов В. П. и др. // Геомагнетизм и аэрномия. 1988. Т. 28, № 5. С. 693.
32. Sergeev E., Grach S., Shindin A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. Art. no. 065002.

Поступила в редакцию 11 июля 2013 г.; принята в печать 28 февраля 2014 г.

**STUDY OF THE PLASMA TURBULENCE DYNAMICS BY MEASUREMENTS
OF DIAGNOSTIC STIMULATED ELECTROMAGNETIC EMISSION.
I. EXPERIMENTAL RESULTS**

E. N. Sergeev and S. M. Grach

We consider the possibilities of studying the evolution of the plasma wave spectrum and artificial striations of the plasma density at different altitudes of the disturbed ionospheric region modified by high-power HF radio waves from the SURA heating facility based on measurements of the dynamic characteristics of diagnostic stimulated electromagnetic emission.