

УДК 533.951+537.868

ГИРОГАРМОНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕНЕРАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

*В. Л. Фролов*¹, *И. А. Болотин*¹, *Г. П. Комраков*¹, *Г. Г. Вертоградов*²,
*В. Г. Вертоградов*², *Е. Г. Вертоградова*², *А. Д. Акчурина*³, *В. В. Бочкарёв*³,
*А. М. Дрешер*³, *Е. Ю. Зыков*³, *Р. Р. Латыпов*³, *И. Р. Петрова*³, *К. М. Юсупов*³,
*В. Е. Кунницын*⁴, *А. М. Падохин*⁴, *Г. А. Курбатов*⁴

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

² Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону;

³ Приволжский федеральный университет; г. Казань;

⁴ Московский госуниверситет, г. Москва, Россия

Рассматриваются гирогармонические свойства генерации искусственных ионосферных неоднородностей различных масштабов, возбуждаемых при модификации области F_2 ионосферы в условиях, когда частота волны накачки близка к четвёртой гармонике гирочастоты электронов в области взаимодействия мощной короткой радиоволны обыкновенной поляризации с плазмой.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на более чем сорокалетнюю историю исследования свойств искусственной ионосферной турбулентности, возбуждаемой при нагреве ионосферной плазмы мощными короткими радиоволнами, ряд особенностей её генерации до сих пор ещё недостаточно изучен. Среди них в первую очередь должна быть отмечена специфика генерации турбулентности в ситуации, когда частота мощной радиоволны обыкновенной (О) поляризации близка к одной из гармоник гирочастоты электронов nf_{ce} ($f_{ce} \approx 1,35$ МГц — гирочастота электронов, n — номер гирогармоники) в области её взаимодействия с плазмой F_2 -области среднеширотной ионосферы, и свойства различных её компонент испытывают сильные вариации при изменении частоты волны накачки (ВН). Как показали исследования [1, 2], это приводит к кардинальным изменениям спектральных характеристик искусственного радиоизлучения ионосферы даже при небольших (около 1 %) изменениях $f_{ВН}$ относительно nf_{ce} .

В экспериментах по исследованию свойств ракурсного рассеяния коротких радиоволн на декаметровых неоднородностях плотности плазмы, выполненных в марте 1995 года [3], было обнаружено, что при $f_{ВН}$ порядка или немного выше $4f_{ce}$ наблюдается значительное (до $5 \div 10$ Гц) уширение спектра рассеянного сигнала, причём по этим измерениям широкополосная компонента рассеяния имела очень короткие ($50 \div 70$ мс) времена релаксации. Объяснение этого эффекта привело к развитию теории генерации интенсивных сверхмелкомасштабных ($l_{\perp} \approx 10 \div 20$ см, l_{\perp} — размер неоднородностей поперёк геомагнитного поля) искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН) плотности плазмы, возбуждаемых внутри декаметровых неоднородностей [4]. Задача обнаружения этих сверхмелкомасштабных неоднородностей и изучение их свойств в значительной степени определяет сегодня интерес к экспериментам в условиях гирогармонического нагрева плазмы и является одним из приоритетных направлений исследований, выполняемых на стенде «Сура» (НИРФИ, г. Нижний Новгород). Необходимо отметить, что в [5] было сообщено о результатах зондирования возмущённой области ионосферы сигналами навигационных спутников системы GPS, которые авторами работы представляются как доказательство генерации сильных сверхмелкомасштабных неоднородностей.

Начиная с 2004 года, на стенде «Сура» в развитие исследований [3] было проведено несколько циклов измерений по изучению свойств ракурсного рассеяния радиоволн коротковолнового диапазона (рассеяние на неоднородностях с $l_{\perp} \approx 10 \div 20$ м), некоторые результаты которых были представлены в [6–8]. Целью данной работы является анализ всего полученного нами в последние годы нового обширного экспериментального материала по изучению особенностей гирогармонического нагрева плазмы F_2 -области ионосферы, которые позволяют построить более полную эмпирическую модель эффекта уширения спектра сигналов при ракурсном рассеянии коротких радиоволн. В работе также будут рассмотрены полученные результаты по рассеянию средних и коротких радиоволн на неоднородностях с $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м, результаты зондирования возмущённой области ионосферы сигналами спутников GPS, гирогармонические эффекты, наблюдаемые при рассеянии мощной радиоволны на искусственных неоднородностях плотности плазмы (эффект саморассеяния [7, 9]). Представленные в работе результаты были получены в экспериментах на стенде «Сура» с участием исследовательских групп из НИРФИ, Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону), Приволжского федерального университета (г. Казань) и Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (г. Москва). Необходимо отметить, что все измерения выполнялись в условиях низкого или очень низкого уровня геомагнитной возмущённости.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1.1. Спектральные характеристики сигналов ракурсного рассеяния на декаметровых неоднородностях

Представленные в этой части работы исследования были выполнены на приёмном пункте ЮФУ, расположенном вблизи г. Ростов-на-Дону (координаты $47,14^{\circ}$ с. ш., $39,39^{\circ}$ в. д.). Этот пункт оснащён многочастотным доплеровским радаром, позволяющим проводить непрерывные длительные измерения и регистрацию квадратурных составляющих коротковолновых сигналов не менее, чем от 30 источников излучения. Основу измерительной аппаратуры составляют персональный компьютер, GPS-приёмник для точной временной синхронизации регистрируемых данных, многоканальное цифровое радиоприёмное устройство ЦРПУ-КВ (ФГУП «ГКБ «Связь»). ЦРПУ-КВ является приёмником прямого усиления в первичной полосе $2 \div 32$ МГц. Он оснащён по входу блоком широкополосных программируемых фильтров, 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем с частотой оцифровки первичного канала 70 МГц и встроенным программируемым блоком предварительной цифровой обработки сигналов; динамический диапазон приёмника составляет не менее 100 дБ. С помощью встроенного блока предварительной цифровой обработки сигналов в полосе приёма обеспечивается выделение до 30 вторичных узкополосных каналов с полосой 10 кГц. Каждый канал может независимо настраиваться на любую частоту в пределах первичной полосы пропускания. Дальнейшая регистрация и предварительная обработка высокочастотных сигналов выполняется с помощью компьютера. При этом осуществляются дополнительная цифровая фильтрация по каждому независимому вторичному узкополосному каналу с помощью комплексных рекурсивных цифровых фильтров 10-го порядка с полосой пропускания 20 Гц; понижение частоты дискретизации квадратурных компонент сигнала до 200 Гц; расчёт спектральных характеристик принятых сигналов; визуализация спектральных характеристик в реальном масштабе времени; сохранение квадратурных компонент всех сигналов с частотой дискретизации 200 Гц на жёстком диске для последующей их более детальной обработки. В качестве приёмной используется V-образная антенна с длиной плеча 100 м и углом раскрытия плеч 40° , ориентированная на нагревный стенд «Сура». Подробное описание приёмно-регистрирующей аппаратуры можно найти в [10].

Остановимся вначале на анализе результатов эксперимента, выполненного 19 августа 2004 года. Он был организован следующим образом. Согласно разработанной в [1, 11, 12] методике, частота гирогармоники электронов находилась по подавлению в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) генерации его компоненты DM (down-shifted maximum, наиболее мощная узкополосная компонента в спектре ИРИ с частотой спектрального максимума на $9 \div 15$ кГц ниже частоты волны накачки); здесь же имеет место подавление генерации мелкомасштабных искусственных неоднородностей. Спектральные характеристики ИРИ во время проведения экспериментов контролировались с помощью спектроанализатора НР 3885А на развёрнутом на стенде «Сура» приёмном пункте. Отметим, что выбранная методика позволяет определять частоту четвёртой гирогармоники с точностью не хуже, чем ± 5 кГц [12]. Относительно определённой таким образом частоты гирогармоники выбирался диапазон сканирования с шириной до $80 \div 100$ кГц, которая определяется частотной полосой пропускания передатчиков стенда. Шаг перестройки частоты волны накачки по выбранному диапазону составлял 20 кГц. При этом сканирование задавалось таким образом, чтобы одна из частот волны накачки попадала в область резонанса на четвёртой гирогармонике $f_{ВН} \approx 4f_{се}$. В этом цикле измерений волна накачки излучалась вертикально вверх с эффективной мощностью $P_{эфф} \approx 150$ МВт (работали все три модуля стенда). На каждой из выбранных частот волны накачки модификация ионосферы продолжалась в течение 105 с, в следующей за этим 15-секундной паузе осуществлялась перестройка на новое значение $f_{ВН}$. Во время выполнения цикла сканирования по получаемым с помощью спектроанализатора спектрам ИРИ проводилась оперативная оценка «ухода» частоты гирогармоники за счёт естественного суточного изменения ионосферных параметров. С учётом этих данных определялся новый диапазон сканирования для следующего цикла измерений и выполнялась подстройка передатчиков стенда под выбранный диапазон. Всего за время рассматриваемого в работе периода измерений было выполнено 8 циклов сканирования.

Аналогичная схема эксперимента применялась нами и в других измерениях по изучению гирогармонических свойств генерации искусственной ионосферной турбулентности, результаты которых рассматриваются в данной работе.

Сигналы ракурсного рассеяния для московской станции РВМ на частотах 9996 кГц (диагностика искусственных ионосферных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 16$ м) и 14996 кГц ($l_{\perp} \approx 11$ м), а также для ряда вещательных станций в диапазоне $15 \div 22$ МГц ($l_{\perp} \approx 9 \div 11$ м) регистрировались на приёмном пункте, расположенном около г. Ростов-на-Дону. На рис. 1 приведены результаты двух сеансов измерений спектра рассеянного сигнала, выполненных 19 августа 2004 года. Частота $f_{ВН}$ в этих экспериментах изменялась с шагом 20 кГц от 5340 до 5400 кГц около четвёртой гирогармоники ($4f_{се} \approx 5360$ кГц для сеанса 19:58÷20:22 MSK и около 5340 кГц для сеанса 20:28÷20:44 MSK). На рис. 1 частоты волны накачки указаны цифрами под осью абсцисс. Отметим, что с 00 по 08 минуту (см. рис. 1а) и с 30 по 38 минуту (см. рис. 1б) каждого часа станция РВМ излучает высокостабильные несущие на сетке частот, что использовалось нами для проведения детальных спектральных измерений. Критическая частота F_2 -слоя ионосферы f_{0F_2} составляла порядка 5,6 МГц ($f_{ВН} < f_{0F_2}$) для первого цикла измерений и 5,4 МГц ($f_{ВН} \approx f_{0F_2}$) для второго. Геомагнитная обстановка во время измерений была спокойной и характеризовалась суммарным K_p индексом $\Sigma K_p = 10^+$. В этих сеансах сигналы ракурсного рассеяния регистрировались на частоте 14996 кГц.

Анализ полученных данных в выполненных 19 августа 2004 года экспериментах с учётом результатов ранее проведённых исследований [6, 7] позволяет заключить, что:

1) рассеянный сигнал может быть представлен как сумма узкополосной и широкополосной его компонент, первая из которых по своим характеристикам соответствует рассеянию, наблюдаемому вне области влияния гирогармонического резонанса, в то время как вторая (широкополосная)

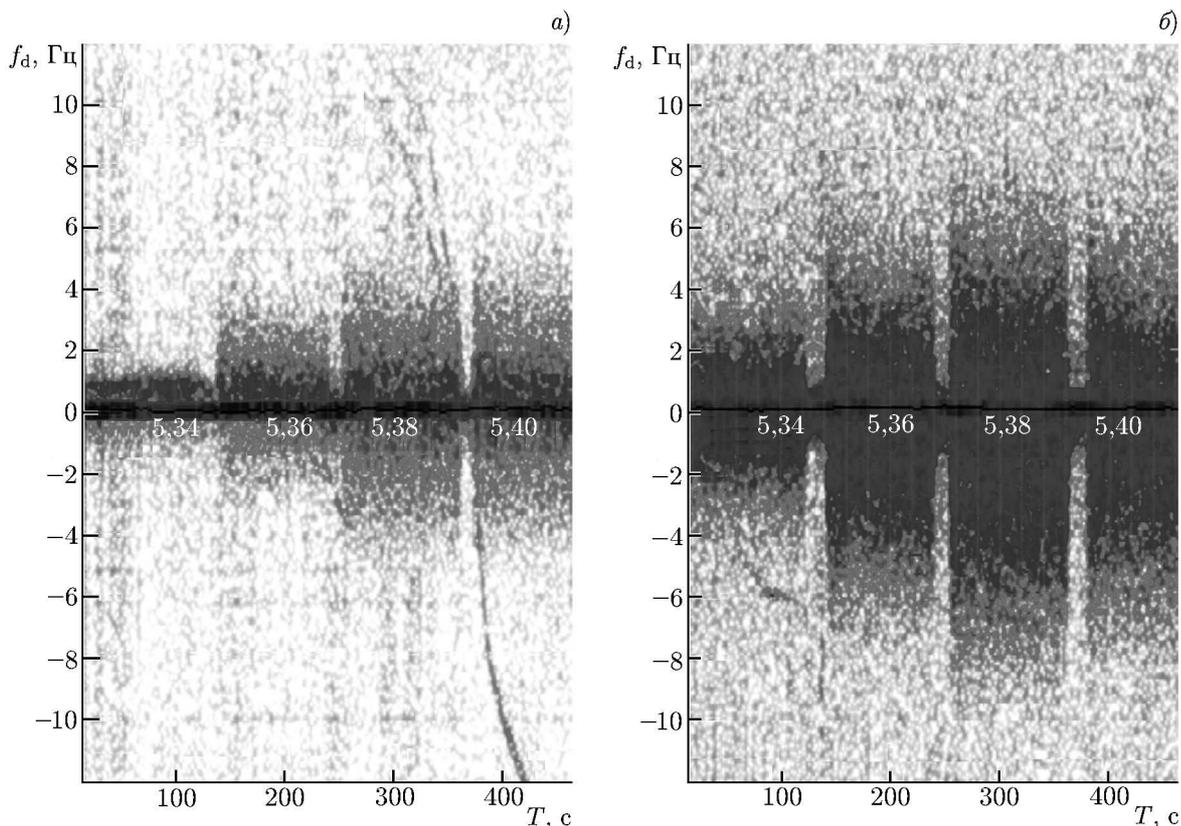


Рис. 1. Примеры спектров рассеянного сигнала для двух сеансов измерений, выполненных 19 августа 2004 года, когда частота $f_{ВН}$ изменялась с шагом 20 кГц от 5 340 до 5 400 кГц около частоты четвёртой гирогармоники. Частота четвёртой гирогармоники $4f_{се} \approx 5\,360$ кГц для сеанса 19:58÷20:22 MSK и 5 340 кГц для сеанса 20:28÷20:44 MSK

компонента рассеяния обладает ярко выраженными гирогармоническими свойствами;

2) уширение спектра рассеянного сигнала (появление широкополосной компоненты рассеяния) регистрируется уже при $f_{ВН} \approx 4f_{се}$, где наблюдается подавление тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости и генерации мелкомасштабных искусственных неоднородностей [13];

3) максимальное уширение спектра рассеянного сигнала имело место при отстройках от гирогармоники $\delta f = f_{ВН} - 4f_{се} \approx 20 \div 40$ кГц (как и на рис. 1) — там же, где наблюдается наиболее интенсивная медленная компонента ВУМ (broad up-shifted maximum, интенсивная широкополосная компонента ИРИ, которая генерируется в области положительных (до 150 кГц) отстроек относительно частоты волны накачки, когда $f_{ВН} > nf_{се}$ [1, 2, 11].

В табл. 1 приведены результаты обработки полученных в пункте Ростов-на-Дону спектральных характеристик рассеянных сигналов на частоте зондирования 14 996 кГц для двух сеансов измерений, представленных на рис. 1.

Здесь $\delta f = f_{ВН} - 4f_{се}$ определяет величину отстройки частоты волны накачки от частоты гирогармоники. В двух последних столбцах табл. 1 приведены значения ширины спектра принимаемого сигнала ΔF , определённые по уровням -6 и -20 дБ относительно его максимальной спектральной плотности мощности, которые были приняты нами для характеристики ширины спектра узкополосной и широкополосной компонент рассеяния соответственно. Далее ширина спектра широкополосной компоненты $\Delta F_{-20 \text{ дБ}}$ будет обозначаться как ΔF . Отметим, что уровень -20 дБ для измеряемого сигнала примерно соответствует превышению на 20 дБ уровня спектральной плотности мощности шума.

Таблица 1

T (MSK), ч:мин	$f_{\text{ВН}}$, кГц	$\delta f = f_{\text{ВН}} - 4f_{\text{се}}$, кГц	$\Delta F_{-6 \text{ дБ}}$, Гц	$\Delta F_{-20 \text{ дБ}}$, Гц
20:01	5 340	-20	0,5	1,9
20:03	5 360	0	0,7	3,2
20:05	5 380	20	1,9	5,7
20:07	5 400	40	1,3	4,3
21:31	5 340	0	0,7	2,5
21:33	5 360	20	1,4	5,8
21:35	5 380	40	3,1	9,1
21:37	5 400	60	2,0	7,0

Помимо отмеченных выше свойств рассеянных сигналов, в этих измерениях было также установлено, что ширина спектра узкополосной компоненты рассеяния, взятая по уровню -6 дБ, составляла $\Delta F_{-6 \text{ дБ}} \approx 0,3 \div 0,7$ Гц для области частот ниже частоты гирогармоники (для $\delta f < 0$). В области $\delta f \geq 0$ определённая таким образом ширина спектра несколько возрастает, что, скорее всего, связано с влиянием на измерения появляющейся широкополосной компоненты рассеяния. Не исключено также, что увеличение ширины спектра узкополосной компоненты рассеяния при изменении частоты волны накачки вблизи частоты гирогармоники может являться результатом увеличения скоростей хаотических движений рассеивающих неоднородностей, как это принималось, например, в [14]. Однако этот вопрос нуждается в дальнейшем исследовании.

Для широкополосной компоненты рассеяния были определены следующие характеристики. Для искусственных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 11$ м ширина спектра рассеянного сигнала ΔF , которая устанавливалась к концу импульса излучения волны накачки с длительностью 105 с, сильно зависела от величины отстройки δf от гирогармоники: $\Delta F \approx 2 \div 3$ Гц для $\delta f \approx 0$ (т. е. уширение спектра обнаруживается уже в области гирогармонического резонанса по принятой выше методике определения частоты гирогармоники), ΔF имела максимальную величину около 9 Гц для $\delta f \approx 40$ кГц, где регистрируется максимальная интенсивность ВУМ, и уменьшалась до примерно 7 Гц для $\delta f = 60$ кГц во втором сеансе измерений, результаты которых представлены на рис. 1 и в табл. 1. Выполненные исследования также показали (см. рис. 1), что сразу после включения волны накачки ширина спектра может быть на $2 \div 3$ Гц больше, чем ещё через 20 с, когда заканчиваются переходные процессы и устанавливается стационарное состояние для рассеянного сигнала. Было установлено, что спектральная интенсивность широкополосной компоненты рассеяния S экспоненциально уменьшается с ростом отстройки от частоты зондирующей волны как $S \propto \exp(-\alpha |F|)$, имея для частоты $f = 14996$ кГц ($l_{\perp} \approx 11$ м) изменяющуюся в широких пределах скорость спада от 2 до 20 дБ/Гц в зависимости от величины δf и условий проведения измерений. Спектр широкополосной компоненты рассеяния, как правило, имел несимметричную форму чаще с большими значениями коэффициента α в области положительных значений F .

Из приведённых в табл. 1 результатов измерений можно также заключить, что ширина спектра широкополосной компоненты рассеяния увеличивается с приближением частоты $f_{\text{ВН}}$ к f_{0F_2} . Так, при уменьшении f_{0F_2} от 5,6 до 5,4 МГц ($f_{0F_2} \approx f_{\text{ВН}}$ в последнем случае) ширина спектра увеличивалась от 5,7 до 9,1 Гц. По данным, полученным в это же время в приёмном пункте, расположенном около г. Харьков (РАИ НАН, Украина), ширина спектра увеличилась от 8 до 10 Гц [6, 7]. Как будет показано ниже, разные значения ΔF для различных пунктов наблюдений получаются из-за разного положения поверхностей ракурсного рассеяния в возмущённой области ионосферы. На основе представленных в [6, 7] для пункта Харьков результатов можно также заключить, что при одновременном измерении на частотах 9996 и 14996 кГц в первом случае максимум уширения спектра наблюдался при $\delta f \approx 20$ кГц, а во втором — при $\delta f \approx 40$ кГц; при

этом величина максимального уширения была приблизительно пропорциональна частоте зондирования. Кроме того, из представленных в [6, 7] данных следует, что на частоте зондирования 14 996 кГц имеет место медленное небольшое увеличение ширины спектра рассеянного сигнала для $\delta f \approx -20$ кГц в течение всего периода нагрева ионосферной плазмы. Это свидетельствует о том, что слабое уширение спектра рассеянного сигнала может наблюдаться даже при таких больших отрицательных отстройках, но для его обнаружения требуется длительное время нагрева ионосферы. Данный эффект, скорее всего, связан с изменением профиля плотности плазмы при её длительном нагреве мощной радиоволной.

Выполненные измерения показали, что при используемой здесь 15-секундной паузе излучения волны накачки характерное время роста интенсивности широкополосной компоненты рассеяния после начала модификации ионосферы составляло $0,5 \div 1$ с, что соответствует результатам измерений скорости роста мелкомасштабных искусственных неоднородностей при периодическом нагреве ионосферы с короткими паузами между импульсами излучения волны накачки [15, 16]. После выключения накачки широкополосная компонента исчезала за время, не превышающее 1 с, что в этой серии измерений являлось оценкой сверху величины времени релаксации. Это время, тем не менее, много меньше характерного времени релаксации для неоднородностей с $l_{\perp} \approx 11$ м, которое в обычных условиях составляет $5 \div 15$ с.

Последующие наши исследования, выполненные на стенде «Сура» в 2005–2011 годах, были направлены на детальные исследования основных свойств широкополосной компоненты рассеяния. Рассмотрим полученные в них наиболее важные результаты.

Эксперимент, результаты которого рассматриваются ниже, был проведён 26 августа 2010 года с 16:00 до 17:36 MSK [8]. Измерения выполнялись в спокойных геомагнитных условиях, $\Sigma K_p = 18$. Нагревный стенд «Сура» излучал радиоволны О-поляризации на частотах 5 425; 5 445; 5 465 и 5 485 кГц с эффективной мощностью $P_{эфф} \approx 110$ МВт. Диаграмма направленности антенны стенда была ориентирована под углом 12° на юг — в область магнитного зенита для волны накачки, где, с учётом рефракции в ионосфере, мощная радиоволна распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля на уровне верхнегибридного резонанса. На каждой частоте излучение продолжалось 90 с, после чего за паузу воздействия длительностью 30 с устанавливалось следующее значение частоты $f_{ВН}$. После достижения наибольшего своего значения частота $f_{ВН}$ с тем же шагом уменьшалась до наименьшей частоты, затем опять увеличивалась до наибольшей и т. д. Диапазон частот $f_{ВН}$ был выбран таким образом, чтобы в каждом цикле область изменения $f_{ВН}$ захватывала частоту четвёртой гармоники гирочастоты электронов, которая во время эксперимента уменьшилась с 5 465 до 5 425 кГц. По результатам всех выполненных измерений величина отстройки частоты $f_{ВН}$ от гирогармоники $\delta f = f_{ВН} - 4f_{ce}$ изменялась в пределах от -30 до $+60$ кГц.

На рис. 2а представлен характер изменения ширины спектра сигнала ракурсного рассеяния на частоте 14 996 кГц, зарегистрированного на интервале времени 16:52–17:08 MSK, когда значение $4f_{ce}$ было стабильным и составляло 5 425 кГц. Критическая частота F_2 -слоя ионосферы f_{0F_2} для этого сеанса измерений составляла порядка 5,5 МГц (т. е. нагрев ионосферы осуществлялся на частоте волны накачки, которая была лишь немного ниже, чем f_{0F_2}). Измерения выполнялись при отстройках от частоты гирогармоники $\delta f = f_{ВН} - 4f_{ce} \approx 20; 0; 20; 40; 60; 40; 20; 0$ кГц в циклы нагрева, начинавшиеся в 16:52, 16:54, 16:56, 16:58, 17:00, 17:02, 17:04 и 17:06 MSK соответственно. Заметим, что в предшествующем данному сеансу измерений цикле нагрева с началом в 16:50 MSK величина отстройки составляла $\delta f = 40$ кГц. Каждый единичный спектр представленных на рис. 2а данных был получен за время 0,64 с. Для этого же сеанса измерений на рис. 2б для каждого значения δf приведены спектры плотности мощности на стационарной стадии развития широкополосной компоненты рассеяния.

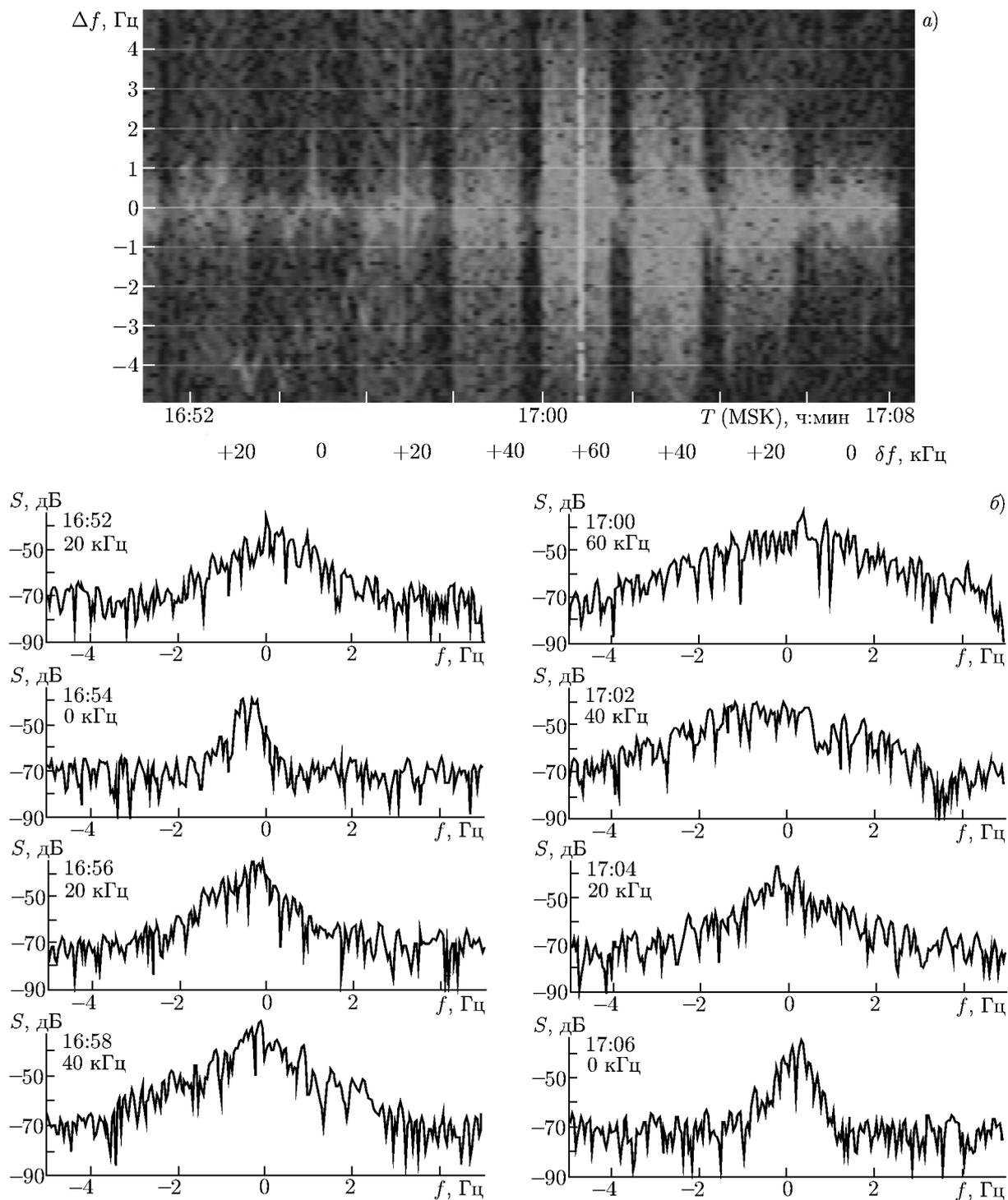


Рис. 2. На панели (а) представлен характер изменения ширины спектра сигнала ракурсного рассеяния на частоте 14 996 кГц. Эксперимент выполнялся 26 марта 2010 года $T = 16:52 \div 17:08$ MSK. Измерения выполнялись при отстройках от частоты гирогармоники $\delta f = f_{\text{ВН}} - 4f_{\text{се}} \approx 20; 0; 20; 40; 60; 40; 20; 0$ кГц в циклы нагрева, начинавшиеся в 16:52, 16:54, 16:56, 16:58, 17:00, 17:02, 17:04 и 17:06 MSK соответственно; $4f_{\text{се}} \approx 5\,425$ кГц. Для этого же сеанса измерений на панели (б) приведены спектральные плотности мощности рассеянного сигнала для каждого значения δf

На основе представленных на рис. 2 результатов измерений, а также других данных, полученных в этой серии экспериментов, были сделаны следующие выводы.

1) С ростом величины δf ширина спектра широкополосной компоненты рассеянного сигнала ΔF увеличивается от 1,4 Гц при $\delta f \approx 0$ до наибольшего своего здесь значения 6,4 Гц при $\delta f \approx 60$ кГц, где узкополосная компонента рассеяния становится неразличимой на фоне наиболее развитой широкополосной, т. е. её спектральная интенсивность не превышает спектральной интенсивности широкополосной компоненты рассеяния. Величина интегральной спектральной плотности мощности рассеянного сигнала была минимальна при $\delta f \approx 0$, что подтверждает тем самым попадание в область гирогармонического резонанса.

2) Наблюдается эффект гистерезиса в зависимости ΔF от δf , когда на ветви уменьшения величины отстройки от гирорезонанса после $\delta f \approx 40$ или 60 кГц ширина спектра широкополосной компоненты рассеяния ΔF имеет бóльшие значения, чем на ветви её увеличения с началом измерений при $\delta f \leq 0$. При этом на отстройке $\delta f \approx 0$ на ветви её уменьшения спектр остаётся заметно более широким, чем на ветви роста, особенно если этот рост начинается с отрицательных отстроек δf . При выбранной схеме перестройки частоты волны накачки невозмущённые (или слабо возмущённые) значения ΔF для $\delta f \approx 0$ можно получить только в ситуации, когда предыдущий нагрев плазмы осуществлялся при отрицательных значениях δf . Но и в этом случае ширина спектра рассеянного сигнала для $\delta f \approx 0$ была уже в несколько раз больше, чем для $\delta f < 0$. Поскольку время влияния последствия нагрева плазмы на гирогармонические свойства возбуждаемой низкочастотной турбулентности было больше 30 с (больше длительности паузы излучения волны накачки), имеются все основания связывать его с развитием эффектов тепловой природы. При этом наиболее вероятно, что оно определяется влиянием остаточного уровня декаметровых искусственных неоднородностей, которые не успевают полностью релаксировать за время паузы излучения волны накачки.

3) Широкополосная компонента спектра рассеянного сигнала, обладающая гирогармоническими свойствами, развивается, как и декаметровые неоднородности, за время порядка 0,3 с и быстро релаксирует за время меньше или порядка 0,6 с. Короткие времена её развития, как указывалось выше, связаны с сильным проявлением эффектов последствия при периодическом нагреве ионосферы с короткими паузами излучения волны накачки. Однако её время релаксации оказалось более чем на порядок меньше времени релаксации декаметровых искусственных неоднородностей вне областей гирогармонических резонансов, которые в данной серии измерений составляли около 8 с и совпадали с временами релаксации узкополосной компоненты рассеяния, регистрируемой здесь при $\delta f < 0$.

4) С приближением частоты $f_{ВН}$ к f_{0F_2} наблюдается рост величины уширения спектра рассеянного сигнала, например, для $\delta f \approx 30$ кГц значение ΔF увеличивается от 3,6 Гц до 4,9 Гц при уменьшении f_{0F_2} от 5,8 до 5,5 МГц.

5) Из рис. 2б следует, что при $\delta f \approx 0$ сигнал узкополосной компоненты оказывается подавленным на 5÷8 дБ. При этом время его развития возрастает здесь до 30 с по сравнению с 0,3 с вне этой области, что является дополнительным свидетельством подавления генерации декаметровых искусственных неоднородностей при приближении частоты волны накачки к частоте гирогармонического резонанса.

Следующий эксперимент, на анализе результатов которого мы остановимся, был проведён 24 марта 2010 года. В первой его части (с 16:22 до 17:09 MSK) критическая частота $f_{0F_2} \approx 5,9$ МГц в начале цикла измерений, 5,6 МГц в период 16:30÷16:50 MSK и уменьшилась до 5,3 МГц к концу сеанса измерений. Мощная радиоволна излучалась с $P_{эфф} \approx 100$ МВт в режиме 1 мин — излучение, 1 мин — пауза сначала на частоте 5 495 МГц (до 16:36 MSK), затем на 5 475 МГц (до 16:46 MSK) и позднее на 5 455 МГц. Переход на всё меньшую частоту волны накачки отслежи-

вал уменьшение частоты четвёртой гирогармоники в силу естественного её изменения с ростом высоты отражения мощной радиоволны таким образом, чтобы при этом значение δf оставалось в пределах $35 \div 40$ кГц во время измерений. Диаграмма направленности была ориентирована в область магнитного зенита для волны накачки. Зондирование возмущённой области ионосферы проводилось здесь на частоте 14 996 кГц.

Отметим, что суммарный трёхчасовой K_p -индекс (ΣK_p) за время проведения данной серии измерений 23, 24 и 25 марта 2010 года составлял 2^- ; 7^- и 12^- соответственно, показывая постепенно увеличивающийся, но остающийся слабым уровень геомагнитной возмущённости.

В этом сеансе, если сравнивать характеристики рассеянного сигнала для $f_{ВН} = 5495$ кГц ($f_{0F_2} \approx 5,6$ МГц, работа вблизи критической частоты, но $f_{ВН} < f_{0F_2}$) и для $f_{ВН} = 5455$ кГц ($f_{0F_2} \approx 5,3$ МГц, когда уже $f_{ВН} \geq f_{0F_2}$), можно сделать следующие выводы:

1) при уменьшении f_{0F_2} ширина спектра широкополосной компоненты рассеяния ΔF увеличилась с 2 до 6,8 Гц;

2) при уменьшении f_{0F_2} время развития неоднородностей с $l_{\perp} \approx 11$ м уменьшилось с $4 \div 6$ с до $1,7 \div 2$ с; время их релаксации уменьшилось с 10 с до $2 \div 3$ с для быстрой её стадии и с $20 \div 40$ с до $6 \div 19$ с — для медленной [16], причём меньшие времена релаксации для $f_{ВН} = 5455$ кГц регистрировались для более поздних времён наблюдения (или для более низких значений критических частот). Причина такого сильного уменьшения времён релаксации искусственных неоднородностей в настоящее время остаётся неясной. Не исключено, что она связана с зависимостью времени релаксации мелкомасштабных неоднородностей от их месторасположения внутри возмущённой области ионосферы [17]. Однако для подтверждения такого заключения требуется проведение дополнительных исследований.

На интервале времени $17:00 \div 17:07$ MSK, когда зондирующая волна излучалась в режиме «несущая», а сам рассеянный сигнал имел высокую интенсивность, была выполнена специальная его обработка с целью более точного определения характерных времён развития и релаксации широкополосной компоненты рассеяния. Для этого выполнялся спектральный анализ рассеянного сигнала с помощью многооконного метода (МТМ-метод) при длине выборки 0,32 с. Окно анализа смещалось по времени с шагом 0,1 с, что обеспечивало точность определения характеристик рассеянного сигнала не хуже, чем 0,16 с. Для этого сеанса характерное время развития широкополосной компоненты составляло $0,3 \div 0,5$ с, а время релаксации — $0,4 \div 0,9$ с. При этом уменьшение её интенсивности на стадии релаксации определялось быстрым обужением спектра принимаемого сигнала с темпом 1 Гц за $0,2 \div 0,3$ с. Полученное время релаксации для широкополосной компоненты рассеяния соответствует его значениям, полученным в других наших измерениях, но оно оказалось на порядок больше приведённой в [3] его величины $0,05 \div 0,07$ с. Отмечается также, что с ростом интенсивности рассеянной компоненты значения характерных времён её развития и релаксации могут уменьшиться до двух раз, что указывает на зависимость величин этих параметров от местоположения поверхности ракурсного рассеяния в возмущённой области ионосферы. На рис. 3 приведён характер изменения энергии рассеянного сигнала $E_{\text{Noise}+10}$, найденной по критерию превышения на 10 дБ спектральной плотности сигнала над спектральной плотностью шума (а), и поведение при этом ширины полосы рассеянного сигнала $\Delta f_{\text{Noise}+10}$, определённой по тому же критерию (б).

Во второй части этого эксперимента измерения с $18:16$ до $19:00$ MSK проводились на частоте $f_{ВН} = 5355$ кГц при $\delta f \approx 25$ кГц, когда $f_{0F_2} \approx 5,3$ МГц в начале и конце сеанса измерений и временно повышалась до $5,7$ МГц в его середине. Здесь на интервале времени $18:22 \div 18:29$ и $18:50 \div 18:59$ MSK ширина спектра рассеянного сигнала для частоты зондирования 14 996 кГц была 3 Гц, однако на интервале времени $18:30 \div 18:37$ MSK имело место временное резкое её увеличение до значений $4,5 \div 6,5$ Гц. В это же время без каких-либо видимых изменений характеристик

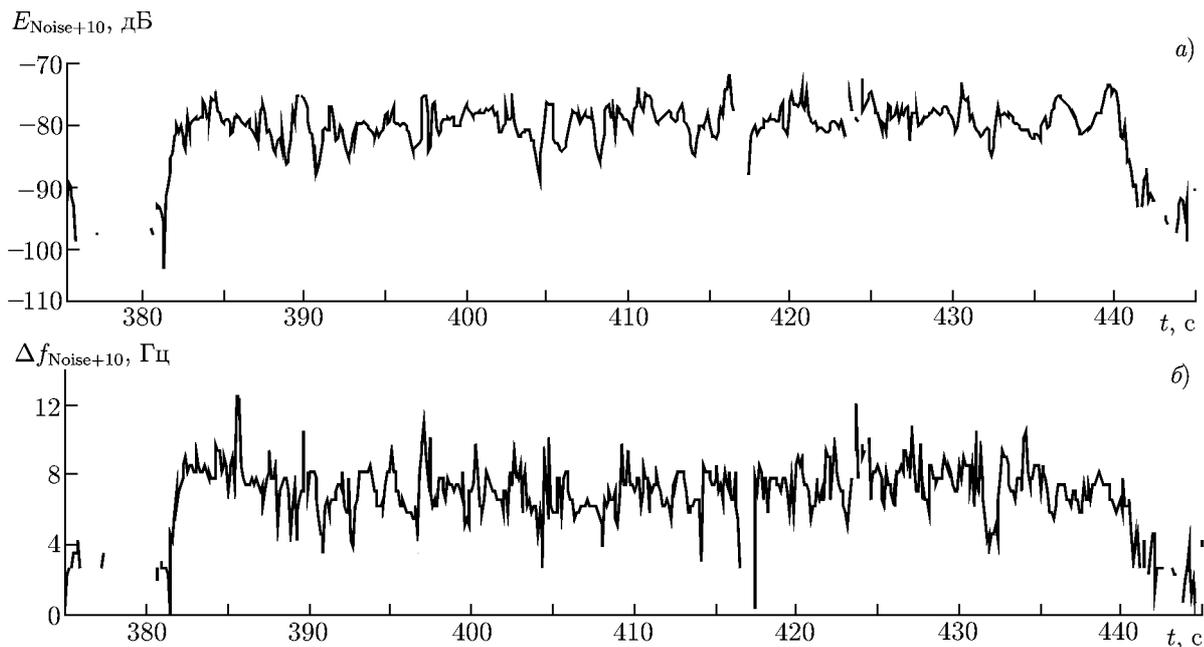


Рис. 3. Осциллограммы поведения энергии рассеянного сигнала $E_{\text{Noise}+10}$, найденной по критерию превышения на 10 дБ спектральной плотности сигнала над спектральной плотностью шума (а), и ширины полосы рассеянного сигнала $\Delta f_{\text{Noise}+10}$, определённой по тому же критерию (б)

Таблица 2

$f_{\text{ВН}}$, кГц	Δf , кГц	ΔF , Гц
5435	40	4,4
5415	20	4,5
5375	0	3,1
5355	-20	0,5
5375	20	2,9
5395	45	6,1

узкополосной компоненты рассеяния наблюдалось увеличение на 10 дБ интегральной энергии широкополосной компоненты рассеянного сигнала, спектральная интенсивность которого была на 10 дБ и больше выше уровня шумов. В этом сеансе измерений параллельно с ракурсным рассеянием на частоте 14 996 кГц наблюдалось рассеяние на частоте 21 610 кГц (для $l_{\perp} \approx 9$ м). По полученным для этой частоты зондирования данным интенсивность широкополосной компоненты рассеянного сигнала и ширина её спектра постепенно нарастали с 18:43 до

18:59 MSK, демонстрируя совершенно иной характер их зависимостей от времени, чем для частоты 14 996 кГц. Такое резкое и, кроме того, разнонаправленное изменение ширины спектра широкополосной компоненты рассеяния для этих двух близких частот зондирования может свидетельствовать о том, что в разных частях области рассеяния величина уширения может быть различной. На основании этих данных следует заключить, что свойства механизма, приводящего к уширению спектра рассеяния, испытывают сильные вариации внутри возмущённой области ионосферы.

Рассмотрим теперь результаты измерений, выполненных 25 марта 2010 года с 17:54 до 19:00 MSK, когда частота волны накачки сначала убывала с шагом 20 кГц от 5 435 до 5 355 кГц, а затем нарастала до 5 395 кГц, перекрывая интервал изменения δf от -20 до +45 кГц. Режим излучения волны накачки был 30 с — излучение, 30 с — пауза; измерения выполнялись при $f_{\text{ВН}}$ немного ниже критической частоты f_{0F_2} , которая составляла 5,6 МГц.

В табл. 2 приведены результаты измерений ширины спектра для широкополосной компоненты рассеяния в зависимости от δf . Из этих данных можно заключить, что наибольшая ширина спек-

тра широкополосной компоненты наблюдается при $\delta f \approx 45$ кГц; при -20 кГц широкополосная компонента уже не обнаруживается; имеет место проявление эффекта гистерезиса в зависимости $\Delta F(\delta f)$, подтверждающее, в целом, ранее сделанные выводы.

В марте 2010 года проводились также угломерные измерения сигналов ракурсного рассеяния, которые показали, что, например, 23 марта с переходом с $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц на 5455 кГц, для которой $\delta f \approx 0$ кГц, и дальше на 4785 кГц (переход происходил на интервалах времени с 16:00 до 16:30 MSK и с 17:05 до 18:16 MSK соответственно) наблюдались заметные изменения угловых характеристик принимаемых рассеянных сигналов. В табл.3 представлены значения измеренных радиопеленгатором углов прихода Δ и азимутальных углов α . В последнем столбце таблицы приведены высоты отражения волны накачки, вблизи которых наблюдается развитие наиболее интенсивной искусственной ионосферной турбулентности.

Таблица 3

$f_{\text{ВН}}$ кГц	Δ , град	α , град	h , км
4300	13÷14	21÷24	185
5455	17÷23	16÷23	190
4785	15÷16	20÷24	210

Из приведённых в табл.3 данных видно, что угловые характеристики рассеянных сигналов в случае модификации плазмы при $f_{\text{ВН}} \approx 4f_{\text{се}}$ и вне гирогармонического резонанса явно отличаются. По сравнению с частотами волны накачки 4300 и 4785 кГц при гирогармоническом нагреве ($f_{\text{ВН}} = 5455$ кГц) имеет место возрастание углов прихода Δ и уширение их углового спектра, что не может быть связано с изменением высоты области рассеяния (см. результаты измерений для 4300 и 4785 кГц, когда высота отражения увеличилась на 25 км, но это привело к увеличению угла Δ только на 2°), и более широкий сектор азимутальных углов α за счёт расширения области рассеяния к западу на 90 км от её обычно наблюдаемого центра (среднее значение пеленга на центр возмущённой области обычно составляет $\alpha \approx 22^\circ$, что соответствует результатам измерений для частот волны накачки 4300 и 4785 кГц). Для выяснения причин такого поведения угловых характеристик рассеянных сигналов необходимо провести дополнительные измерения и выполнить модельные расчёты трасс распространения зондирующих и рассеянных сигналов. Возможно это связано с изменением степени ракурсности рассеяния в условиях гирогармонического нагрева ионосферной плазмы.

Рассмотрим теперь результаты измерений ракурсного рассеяния на неоднородностях с $l_{\perp} \approx 11$ м, выполненных 26–28 марта 2011 года. В них волна накачки излучалась с $P_{\text{эфф}} \approx 70$ МВт (26 марта) и с $P_{\text{эфф}} \approx 150$ МВт (27 и 28 марта) в режиме 90 с — излучение, 30 с — пауза (за исключением двух последних приведённых в табл.4 сеансов, когда режим был 10 с — излучение, 10 с — пауза); диаграмма направленности антенны была наклонена на 12° на юг в область магнитного зенита для волны накачки. Эксперименты выполнялись с 18:00 до 20:00 MSK в условиях вечерней ионосферы. Критическая частота f_{0F_2} варьировалась во время измерений в пределах $5,5 \div 6,0$ МГц. Эксперименты проводились в очень спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 1^+$, 3^- и 5^- 26, 27 и 28 марта соответственно). Частота $f_{\text{ВН}}$ изменялась относительно $4f_{\text{се}}$ в пределах от -30 до $+70$ кГц. Эти измерения показали, что наиболее широкие спектры широкополосной компоненты рассеяния наблюдались при $\delta f \approx 50 \div 60$ кГц, при этом величина ширины спектра сильно зависела от условий проведения измерений.

В табл.4 для значений $\delta f \approx 40 \div 60$ кГц приведены значения ширины спектра рассеянного сигнала ΔF , полученные в разных сеансах измерений, и значения максимальной спектральной интенсивности принимаемого сигнала S_{max} (в децибелах относительно некоторого аппаратурного уровня). Значения критической частоты f_{0F_2} показаны в последнем столбце таблицы.

На основе представленных в табл.4 данных можно заключить, что даже для одинаковых или

Таблица 4

Дата	Время (MSK), ч:мин:с	δf , кГц	S_{\max} , дБ	ΔF , Гц	f_{0F_2} , МГц
26.03.2011	18:01:00	40	-62	2,5	6,0
26.03.2011	18:23:20	50	-51	6,1	6,0
26.03.2011	18:36:00	50	-47	5,1	6,0
27.03.2011	19:21:50	50	-55	2,5	5,5
27.03.2011	19:27:40	50	-52	2,9	5,5
27.03.2011	19:34:00	60	-56	3,2	5,5
27.03.2011	19:51:50	60	-50	3,1	5,5
28.03.2011	19:23:00	50	-54	2,5	5,9
28.03.2011	19:28:20	50	-54	3,5	5,9
28.03.2011	20:24:50	60	-41	6,8	5,8
28.03.2011	20:35:55	50	-41	4,6	5,8

близких значений δf , f_{0F_2} и S_{\max} может иметь место заметное расхождение в измеренных величинах ΔF . Тем не менее, можно отметить тенденцию возрастания ширины спектра широкополосной компоненты рассеяния при увеличении её интенсивности.

Наконец, рассмотрим результаты экспериментов, выполненных 19–22 августа 2011 года. В этих измерениях волна накачки излучалась с $P_{\text{эфф}} \approx 70$ МВт; диаграмма направленности антенны была наклонена на 12° на юг в область магнитного зенита для волны накачки. Эксперименты, в основном, выполнялись с 18:00 до 22:00 MSK в условиях вечерней ионосферы и в спокойной геомагнитной обстановке ($\Sigma K_p = 4^-; 10; 6^-$ и 12^+ для 19–22 августа соответственно). Эти измерения были направлены на определение значений δf , при которых начинает наблюдаться уменьшение величины уширения спектра широкополосной компоненты рассеяния. Поэтому был выбран диапазон изменения частоты $f_{\text{ВН}}$ относительно $4f_{\text{се}}$ от 0 до +110 кГц. Вторая задача, которая решалась в этой серии измерений, состояла в изучении зависимости ширины спектра ΔF от мощности волны накачки. Особенностью этих экспериментов было то, что изменение частоты или мощности волны накачки происходило в режиме непрерывного её излучения. Как правило, измерение на выбранном номинале мощности или частоты продолжалось 1,5–2 мин, после чего за 10–20 с, без выключения волны накачки, устанавливались их новые значения.

Для сеанса измерений, выполненного 21 августа в условиях, когда излучал только один модуль стенда с $P_{\text{эфф}} \approx 15$ МВт, в табл. 5 для различных значений δf приведены значения ширины спектра ΔF широкополосной компоненты рассеянного на неоднородностях с $l_{\perp} \approx 10,7$ м сигнала и максимальная спектральная интенсивность узкополосной компоненты рассеяния S_{\max} . Критическая частота f_{0F_2} во время измерений была 6,9 МГц, т. е. на 1,5 МГц выше $f_{\text{ВН}}$. Из представленных в табл. 5 данных, а также результатов других измерений можно сделать следующие выводы относительно свойств широкополосной компоненты рассеяния:

1) при перестройке частоты волны накачки без пауз в её излучении не наблюдаются отмеченные раньше заметное уменьшение величины ΔF при $\delta f \rightarrow 0$ и эффект гистерезиса в зависимости $\Delta F(\delta f)$, что может указывать на сильное влияние остаточной турбулентности на свойства исследуемых явлений при таком непрекращающемся нагреве ионосферной плазмы;

2) при превышении величины расстройки $\delta f \approx 70$ кГц ширина спектра широкополосной компоненты начинает постепенно уменьшаться;

3) достаточно высокое значение величины $\Delta F \approx 4,9$ Гц при невысоком уровне мощности волны накачки $P_{\text{эфф}} \approx 15$ МВт указывает на слабую зависимость ΔF от $P_{\text{эфф}}$ (ниже этот вывод будет подтверждён прямыми исследованиями зависимости $\Delta F(P_{\text{эфф}})$).

Таблица 5

Время (MSK), ч:мин:с	δf , кГц	S_{\max} , дБ	ΔF , Гц
21:20:30	50	-53,4	4,9
21:21:40	30	-54,7	4,9
21:22:05	20	-52,5	4,2
21:23:40	10	-55,6	5,0
21:24:30	0	-55,3	4,3
21:25:40	10	-56,6	5,2
21:26:40	50	-54,8	4,6
21:27:35	70	-55,9	4,9
21:28:40	90	-56,1	4,3
21:29:40	110	-54,7	3,4

Таблица 6

Время (MSK) ч:мин:с	$f_{\text{ВН}}$, кГц	δf , кГц	$S_{\max}(11 \text{ м})$, дБ	$\Delta F(11 \text{ м})$, Гц	$S_{\max}(10,5 \text{ м})$, дБ	$\Delta F(10,5 \text{ м})$, Гц
20:00:50	5455	40	-67,1	3,2	-60,3	5,9
20:02:30	5465	50	-70,2	4,3	-60,7	7,3
20:05:00	5475	60	-73,4	5,6	-61,3	6,3
20:06:40	5485	70	-57,7	6,6	-60,0	5,6

В табл. 6 представлены данные выполненных 22 августа 2011 года одновременных измерений на частотах 14 996 и 15 640 кГц ширины спектра широкополосной компоненты в зависимости от максимального значения спектральной плотности энергии рассеянного сигнала при различных величинах δf . Обе станции расположены в районе г. Москва и их частоты соответствуют рассеянию на искусственных неоднородностях с $l_{\perp} \approx 11$ и 10,5 м соответственно. В этих измерениях волна накачки излучалась с $P_{\text{эфф}} \approx 70$ МВт (работало только два модуля стенда); диаграмма направленности антенны была наклонена на 12° на юг в область магнитного зенита для волны накачки. Критическая частота f_{0F_2} во время измерений была 6,6 МГц, т. е. была выше $f_{\text{ВН}}$ на $1,1 \div 1,2$ МГц.

Приведённые в табл. 6 данные показывают, что максимальная ширина спектра широкополосной компоненты рассеяния для очень близких масштабов искусственных неоднородностей $l_{\perp} \approx 11$ и 10,5 м наблюдается при различных δf — при 70 и 50 кГц соответственно. При этом не совпадают и измеренные значения ΔF .

Как это уже неоднократно отмечалось выше, такое расхождение в расстройках δf , при которых наблюдается максимальное уширение спектра широкополосной компоненты рассеяния, или в величине уширения ΔF естественно связывать с несовпадением в пространстве ракурсных поверхностей рассеяния, из чего следует, что в разных частях возмущённой области ионосферы зависимости $\Delta F_{\max}(\delta f)$ и сами значения ΔF могут заметно отличаться. О том, что рассеяние идёт из разных частей возмущённой области ионосферы, свидетельствует и разный ход изменения интенсивностей узкополосной компоненты рассеяния S_{\max} . Здесь важно отметить, что, согласно измерениям [15, 18–22] и многочисленным другим измерениям, характеристики искусственной ионосферной турбулентности испытывают сильные вариации внутри возмущённой области ионосферы. При этом в области магнитного зенита для волны накачки в средних широтах и в области магнитного зенита в высоких широтах интенсивность мелкомасштабных искусственных неоднородностей, величина аномального ослабления, интенсивность ИРИ, величина разогрева электронов плазмы и интенсивность оптических свечений атмосферы максимальны (см., например, [22]).

Таблица 7

Время (MSK), ч:мин:с	$P_{\text{эфф}}$, МВт	S_{max} , дБ	ΔF , Гц
20:30:30	9	-72,0	2,0
20:31:40	18	-69,0	3,2
20:32:35	35	-66,6	4,4
20:33:30	70	-65,0	6,2
20:34:35	35	-68,8	4,4
20:35:30	18	-67,9	3,3
20:36:30	9	-70,8	2,0
20:37:15	70	-65,3	5,3
20:37:45	9	-71,9	3,1

Этот эффект получил название эффекта магнитного зенита [13]. Здесь естественно считать, что, если поверхность ракурсного рассеяния попадает в область магнитного зенита, характеристики искусственной ионосферной турбулентности будут заметно отличаться от случая, когда поверхность будет проходить вне этой области. Из полученных данных можно заключить, что именно в области магнитного зенита, где регистрируется более интенсивная узкополосная компонента рассеяния, наблюдается и наибольшее уширение спектра его широкополосной компоненты.

В табл. 7 для рассеяния на $l_{\perp} \approx 11$ м приведены результаты измерений зависимости ширины спектра широкополосной компоненты рассеяния ΔF от мощности волны накачки. Измерения выполнялись 21 августа 2011 года на интервале времени 20:30:30÷20:36:30 MSK. Работало два модуля стенда. Диаграмма направленности антенны стенда была наклонена на 12° от вертикали на юг в область магнитного зенита для волны накачки. Излучение проводилось на частоте $f_{\text{ВН}} = 5400$ кГц и соответствовало значению $\delta f \approx 40 \div 50$ кГц, где наблюдаются более широкие спектры рассеяния. Переход с одной мощности волны накачки на другую происходил без пауз в её излучении. Критическая частота f_{0F_2} , во время измерений составляла порядка 5,9 МГц.

Приведённые в табл. 7 данные позволяют заключить, что при выбранном режиме ступенчатого с шагом 3 дБ изменения мощности волны накачки без прерывания её излучения во времени в зависимости $\Delta F(P_{\text{эфф}})$ отсутствует эффект гистерезиса, а сама зависимость близка к степенной вида $\Delta F \propto (P_{\text{эфф}})^{1/2}$. Другие выполненные аналогичным образом измерения показывают, что показатель степенной зависимости на ветви увеличения мощности волны накачки может изменяться в пределах $0,5 \div 0,8$. Заметим, что при более резком изменении мощности, например, по схеме $9 \rightarrow 70 \rightarrow 9$ МВт на интервале времени 20:36:30÷20:37:45 MSK (см. последние три строки табл. 7), эффект гистерезиса уже обнаруживается с более слабой зависимостью от мощности на ветви её перехода от 70 к 9 МВт.

Характер зависимости $\Delta F(P_{\text{эфф}})$ полностью соответствует полученной в [23] зависимости интенсивности мелкоаппаратных искусственных неоднородностей от $P_{\text{эфф}}$. Поэтому имеются веские основания связывать величину уширения спектра широкополосной компоненты рассеяния с интенсивностью рассеивающих декаметровых неоднородностей. Это также объясняет отмеченную выше часто наблюдаемую прямую зависимость ширины спектра широкополосной компоненты рассеяния от интенсивности её узкополосной компоненты.

1.2. Гирогармонические свойства генерации искусственных ионосферных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м

В последние годы при проведении экспериментов на стенде «Сура» широкое применение получило зондирование искусственных ионосферных неоднородностей с использованием цифрового

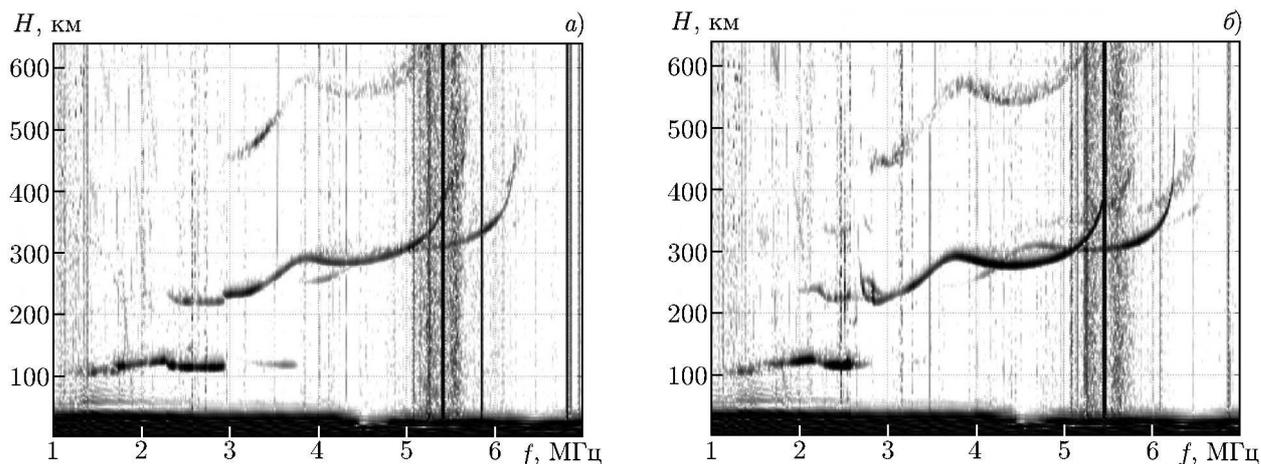


Рис. 4. Примеры двух ионограмм, снятых 26 августа 2010 года в 16:55 и в 16:59 MSK соответственно при $f_{\text{ВН}} = 5425$ кГц ($\delta f \approx 0$) и 5465 кГц ($\delta f \approx 40$ кГц), которые демонстрируют наличие нескольких компонент рассеянных сигналов в различных частотных диапазонах около О- и Х-ветвей вертикального зондирования и усиление рассеяния в случае $\delta f \approx 40$ кГц

ионозонда, расположенного около г. Казань в 170 км к востоку от стенда. Особенности проведения измерений на короткой радиотрассе обратного рассеяния «Сура»—Казань были подробно рассмотрены в [24], где было показано, что в этом случае имеется возможность изучать характеристики промежуточной (между мелкомасштабными и среднемасштабными) области масштабов искусственных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м во всей толще F_2 -слоя ионосферы как в дневных, так и в ночных условиях, измерять времена развития и релаксации неоднородностей на различных высотах F -области, а при выполнении определённых условий проводить измерения свойств неоднородностей и на высотах E -области. Выполненные исследования показали сильную зависимость характеристик принимаемых рассеянных сигналов от рефракционных условий на трассе распространения зондирующих сигналов и от наличия спорадических E -слоёв, а также влияние генерируемых крупномасштабных неоднородностей плотности плазмы на модовую структуру и временные характеристики принимаемых рассеянных сигналов. Выделенность области масштабов искусственных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м заключается в том, что они занимают промежуточное положение между мелкомасштабными неоднородностями с $l_{\perp} \leq 30 \div 50$ м, появляющимися в результате развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости, и среднемасштабными неоднородностями с $l_{\perp} \approx 0,2 \div 1$ км, появляющимися в результате развития самофокусирующей неустойчивости пучка мощных радиоволн. Механизм их генерации сегодня ещё не вполне ясен.

В настоящем разделе работы мы рассмотрим результаты исследований гирогармонических свойств искусственных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м, которые были выполнены на стенде «Сура» в 2010–2011 годах. Первые результаты таких исследований были опубликованы в [8], где было показано, что имеет место подавление генерации таких искусственных неоднородностей при $\delta f \approx -(10 \div 30)$ кГц, неоднородности уже надёжно регистрируются при $\delta f \approx 0$, но остаются ещё заметно слабее по сравнению со случаем $\delta f \approx 10 \div 40$ кГц. Ниже мы приведём более детальный анализ полученных экспериментальных данных.

Рассмотрим результаты измерений, выполненных 26 августа 2010 года с 16:00 до 17:36 MSK в условиях ещё дневной ионосферы, но когда поглощение радиоволн в её нижних слоях уже заметно ослабевает по сравнению с его полуденными значениями. Нагревный стенд «Сура» излучал мощные радиоволны О-поляризации под углом 12° на юг (в область магнитного зенита

для волны накачки) с $P_{эфф} \approx 110$ МВт на частотах 5 425; 5 445; 5 465 и 5 485 кГц в режиме 90 с — излучение, 30 с — пауза (подробно схема этого эксперимента рассматривалась в разделе 1.1). Используемый диапазон перестройки частоты волны накачки позволил выполнить измерения для величин отстройки δf в пределах от -30 до $+60$ кГц. Ионограммы в пункте Казань снимались каждую минуту, причём одна ионограмма, как правило, попадала в начало цикла нагрева, а вторая — в его конец. В начале эксперимента величина $f_{0F_2} \approx 5,8$ МГц, к 16:30 MSK она постепенно уменьшилась до величины 5,5 МГц, оставалась неизменной до 17:15 MSK, после чего опять стала плавно уменьшаться и в 17:35 MSK стала равной 5,25 кГц. На рис. 4 приведены примеры двух ионограмм, снятых в 16:55 и в 16:59 MSK соответственно при $f_{ВН} = 5 425$ кГц ($\delta f \approx 0$) и 5 465 кГц ($\delta f \approx 40$ кГц) при $f_{0F_2} \approx 5,55$ МГц, которые демонстрируют наличие нескольких компонент рассеянных сигналов в различных частотных диапазонах около концов О- и Х-ветвей вертикального зондирования: в областях частот 5,0÷5,5 МГц (действующие высоты 350÷450 км) для $T = 16:55$ MSK и 4,7÷5,7 МГц (действующие высоты 350÷460 км) — около О-ветви; в областях частот 5,8÷6,6 МГц (действующие высоты 370÷470 км) и 6,4÷6,8 МГц (действующие высоты 350÷400 км) для $T = 16:59$ MSK — около Х-ветви, а также зависимость их интенсивности от величины δf . Появление рассеянных сигналов вблизи концов ветвей вертикального зондирования, согласно [24], определяется генерацией искусственных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50\div 90$ м вблизи высоты отражения мощной радиоволны в области её наиболее сильного взаимодействия с плазмой. Видно, что при $\delta f \approx 40$ кГц по сравнению со случаем $\delta f \approx 0$ наблюдается заметное усиление интенсивности рассеянного сигнала, появление новых областей рассеяния около конца Х-ветви и расширение частотного диапазона для области рассеяния около конца О-ветви. Всё это является прямым следствием улучшения условий генерации для этих неоднородностей при $\delta f \approx 40$ кГц по сравнению с $\delta f \approx 0$.

Анализ полученных в этом эксперименте результатов позволил сделать следующие заключения.

1) При величинах отстройки δf от 0 до -10 кГц рассеянные сигналы либо не наблюдались совсем, либо были слабы и имели нерегулярный характер, что говорит о подавлении здесь генерации среднемасштабных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50\div 200$ м.

2) Для компонент сигналов, рассеянных на неоднородностях с $l_{\perp} \approx 50\div 90$ м и регистрируемых вблизи концов О- и Х-ветвей ионограмм в диапазоне частот зондирования 4,7÷6,8 МГц, максимум их интенсивностей и наиболее быстрое (за 5÷10 с) развитие регистрировались чаще всего при $\delta f \approx 20\div 40$ кГц (в отдельных случаях при $\delta f \approx 40\div 60$ кГц). На стационарной стадии развития интенсивность рассеяния при $\delta f \approx 0$ была на 3÷6 дБ слабее по сравнению с $\delta f \approx 40$ кГц, при $\delta f \approx 0$ времена развития неоднородностей здесь также были в несколько раз больше. Интенсивность рассеяния уменьшалась, хотя и более слабо, при увеличении расстройки δf до 60 кГц. На стадии развития искусственных неоднородностей после включения волны накачки их интенсивность после достижения максимального уровня могла уменьшиться на несколько децибел за время порядка минуты, показывая так называемый overshoot-эффект. Для этих неоднородностей также наблюдался эффект гистерезиса: при изменении частоты волны накачки так, что δf принимала последовательно значения около 40; 20; 0 и 20 кГц, интенсивность рассеяния для $\delta f \approx 20$ кГц была выше, если предыдущий цикл излучения волны накачки был при $\delta f \approx 40$ кГц, а не при $\delta f \approx 0$.

3) Для компонент рассеянных сигналов, треки которых находятся в диапазоне частот 1,5÷4 МГц немного выше плоского участка ионограмм вертикального зондирования и которые, согласно [24], наблюдаются только в вечерних и ночных условиях (в отсутствие плотных D- и E-слоёв ионосферы), максимум их интенсивностей регистрировался при $\delta f \approx 40\div 60$ кГц. В этом случае рассеяние происходит на неоднородностях с $l_{\perp} \approx 100\div 200$ м с высот ближе к нижней гра-

нище F_2 -слоя, что может быть на $20 \div 100$ км ниже высоты отражения волны накачки. Эти сигналы характеризуются большими (до 1 мин) временами развития, которые отвечают времени, необходимому для распространения плазменных возмущений вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля до высот рассеяния и роста здесь рассеивающих неоднородностей. Важно отметить, что вначале появление рассеяния уже хорошо обнаруживалось при $\delta f \approx 20 \div 40$ кГц, но ещё не регистрировалось при $\delta f \approx 0$. Это лишний раз указывает на преимущественное развитие таких неоднородностей при $\delta f \approx 20 \div 40$ кГц и подавление их генерации в условиях гирогармонического нагрева ионосферной плазмы. Отмечается также, что время их релаксации в 2–3 раза больше, чем для рассмотренного выше случая неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50 \div 90$ м. Это определяется зависимостью времени релаксации неоднородностей от их размера (пропорционально $l_{\perp}^{1/2}$ [16]), а также высотной зависимостью скорости релаксации из-за высотной зависимости частоты соударений ионов с нейтралами [25].

4) Рассеяние переставало регистрироваться, когда критическая частота f_{0F_2} опускалась ниже 5,3 МГц при $f_{ВН} \approx 5,45$ МГц. Учитывая наклон диаграммы направленности излучения мощной радиоволны 12° на юг и особенности лучевых траекторий для О-волн в магнитоактивной плазме [26], можно заключить, что, как и для мелкомасштабных искусственных неоднородностей с $l_{\perp} \leq 30$ м, возбуждение неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50 \div 90$ м продолжается, пока значение f_{0F_2} не упадёт ниже верхнегибридной частоты для волны накачки, которая для $f_{ВН} \approx 5,5$ МГц составляет 5,3 МГц.

В экспериментах, выполненных 20 августа 2011 года, измерения проводились с 19:30 до 21:30 MSK (в вечернее время суток) в режиме 2 мин — излучение, 3 мин — пауза с $P_{эфф} \approx 60$ МВт (работали только два модуля стенда). Критическая частота $f_{0F_2} \approx 6,9$ МГц, т. е. измерения выполнялись, когда волна накачки отражалась достаточно далеко от максимума F_2 -слоя. ИONOграммы в пункте Казань снимались каждую минуту. Было получено, что наибольшая интенсивность рассеянных сигналов для частот зондирования $5,5 \div 7,0$ МГц, рассеяние которых проходило вблизи высоты отражения волны накачки, имела место в полосе расстройек от гирорезонанса $\delta f \approx 15 \div 40$ кГц, в то время как для частот зондирования около 3 МГц, рассеяние которых проходило вблизи нижней границы F_2 -слоя, максимум интенсивности рассеяния имел место только в узкой области около $\delta f \approx 30$ кГц. Подтвердилось также сделанное выше заключение, что время релаксации рассеянных сигналов уменьшается с ростом частоты зондирования.

Совокупность выполненных исследований позволяет заключить, что генерация искусственных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м обладает гирогармоническими свойствами, причём наибольшее её подавление имеет место при $\delta f \approx -10 \div 0$ кГц. Восстановление генерации этих неоднородностей наблюдается при $\delta f \approx 20 \div 40$ кГц для положительных расстройек и при -30 кГц — для отрицательных.

1.3. Гирогармонические свойства эффекта саморассеяния мощной радиоволны на искусственных неоднородностях

При проведении экспериментов по модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением было установлено, что в спектре отражённого от ионосферы сигнала волны накачки помимо «зеркальной» компоненты присутствует значительная рассеянная составляющая, свойства которой определяются рассеянием мощной радиоволны на индуцируемых ею же искусственных неоднородностях с масштабами порядка нескольких сотен метров. Это явление получило название эффекта саморассеяния. Возможности диагностики искусственных неоднородностей на основе измерения спектра принимаемого сигнала волны накачки были рассмотрены в [7, 9], где было показано, что измеряемое доплеровское смещение частоты рассеянного сигнала мо-

жет быть связано как с изменением профиля плотности плазмы на пути мощной радиоволны от антенны стенда до точки её отражения в ионосфере, так и с дрейфовым движением неоднородностей в области рассеяния. Поскольку спектр рассеянного сигнала определяется распределением рассеивающих неоднородностей по объёму рассеяния и структурой поля мощной радиоволны, которые имеют заведомо сложную форму и зависят от многих слабо контролируемых факторов, интерпретация получаемых экспериментальных данных является сложной задачей и не может быть полностью выполнена только на основе результатов таких спектральных измерений. Тем не менее, изучение свойств саморассеяния может дать полезную дополнительную информацию об особенностях взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Так, например, выполненные исследования [9] позволили установить, что наличие волновых магнитогидродинамических процессов в ионосферной плазме приводит к периодическим изменениям доплеровской частоты в рассеянной компоненте принимаемого сигнала волны накачки, которые могут использоваться для диагностики такого рода процессов.

Ниже рассматриваются результаты измерений спектра принимаемого на земле сигнала волны накачки, который несёт в своей структуре информацию о его зеркально отражённой и рассеянной компонентах. Измерения проводились в августе 2010 года и в марте и августе 2011 года во время выполняемых на стенде «Сура» нагревных кампаний. Их предварительные результаты были опубликованы в [27]. Приёмная аппаратура для измерения спектральных характеристик мощной радиоволны размещалась на территории Казанского (Приволжского) федерального университета, приблизительно в 170 км к востоку от стенда. Два приёмника используемого в измерениях доплеровского комплекса «Спектр» были настроены на частоты радиостанции точного времени РВМ 4996 и 9996 кГц. Третий приёмник настраивался на частоту волны накачки в соответствии с программой работы нагревного стенда. В качестве приёмников использовались связанные КВ приёмники Р339 (диапазон 1÷30 МГц). Применялся метод цифрового приёма с аналоговым квадратурным разложением сигнала на низкой частоте, позволяющий определять фазовые и амплитудные характеристики при цифровой спектральной обработке в динамическом диапазоне до 70 дБ. Стабильность частотных параметров определяется стандартом частоты FS-725 и составляет 10^{-11} (меньше 0,001 Гц на частоте 10 МГц). Более полное описание доплеровского приёмного комплекса «Спектр» приведено в [28]. Сигналы с приёмников записывались с частотой дискретизации 100 Гц. Для выделения особенностей изменения спектра сигнала волны накачки строилась спектрограмма всего периода наблюдений с различными окнами, от 20 до 60 с и перекрытием 5 с. Далее для интересующих нас сеансов проводилась более детальная спектральная обработка принимаемых сигналов. Следует заметить, что при наклоне луча антенны стенда на 12° на юг трасса Москва (РВМ)—Казань проходит в 95 км к югу от центра возмущённой области ионосферы. Если на таком расстоянии искусственные плазменные возмущения и регистрируются, то имеют лишь достаточно слабую интенсивность. Поэтому влияние нагрева ионосферы на характеристики принимаемого прямого сигнала должно либо совсем отсутствовать, либо быть сильно ослабленным.

Рассмотрим сначала результаты эксперимента, проведённого 26 августа 2010 года с 16:00 до 17:36 MSK, когда стенд «Сура» излучал мощные радиоволны О-поляризации последовательно на частотах 5425; 5445; 5465 и 5485 кГц в режиме 90 с — излучение, 30 с — пауза (выше мы уже неоднократно обращались к этому эксперименту). Регистрация сигнала волны накачки на комплексе «Спектр» в этот раз выполнялась только на частоте 5425 кГц. При этом величина отстройки δf во время измерений принимала значения 0, -10 или -20 кГц.

На рис. 5а показаны три спектра принятого сигнала на частоте $f_{ВН} = 5425$ кГц для трёх сеансов нагрева: 1) с началом модификации в 16:30 MSK, когда величина отстройки δf была около -10 кГц; 2) в 17:06 MSK, когда величина δf была близка к 0, и 3) в 17:18 MSK, когда

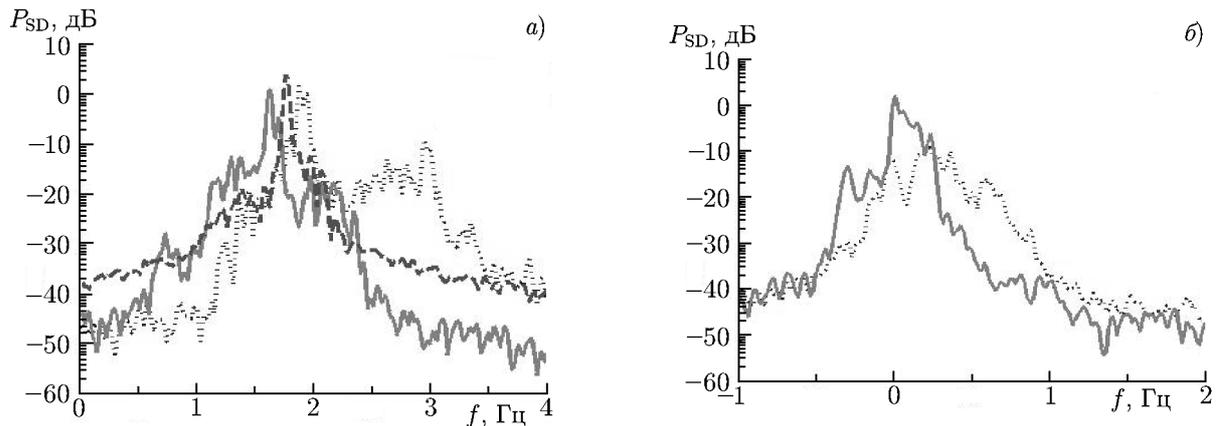


Рис. 5. На панели (а) приведены примеры спектров принятого сигнала (P_{SD} — спектральная плотность мощности) на частоте $f_{ВН} = 5425$ кГц для трёх сеансов нагрева с началом модификации в 16:30 MSK (пунктирная линия), когда величина отстройки δf была около -10 кГц, в 17:06 MSK (сплошная линия), когда δf была близка к 0, и в 17:18 MSK (штриховая линия), когда δf была около -20 кГц. На панели (б) приведены спектры сигнала московской станции РВМ на частоте 4996 кГц для двух сеансов нагрева с началом в 16:30 ($\delta f \approx -10$ кГц), и в 17:06 ($\delta f \approx 0$). Измерения проводились 26 августа 2010 года

величина δf была около -20 кГц. Спектры были построены для интервала времени, близкого к окончанию каждого из циклов нагрева, когда они уже приобретали стационарный вид. Для расстройки $\delta f \approx 0$ помимо центрального узкополосного максимума на частоте $F \approx 1,6$ Гц, отвечающего скачковой моде зеркальной компоненты сигнала, наблюдается ещё выделяющийся спектральный максимум с доплеровским смещением частоты около 0,4 Гц, который на 15 дБ слабее центрального максимума по своей спектральной интенсивности. Для $\delta f \approx -10$ кГц частота центрального максимума была 1,9 Гц. Здесь выделяющейся структурой является широкий максимум в диапазоне $\Delta F \approx 0,4 \div 1,2$ Гц, максимальная спектральная интенсивность которого на 18 дБ меньше спектральной интенсивности центрального максимума. Следует заметить, что сразу после начала модификации ионосферной плазмы спектр имел форму плато в области частот $\Delta F \approx 0,4 \div 1,2$ Гц, и только к концу 90 с нагрева спектральный максимум стал хорошо выделяться за счёт уменьшения спектральной плотности мощности на граничных частотах плато. Отметим, что в иных условиях нагрев в течение 10 с уже был достаточен, чтобы форма спектра достигала своего стационарного состояния. Для $\delta f \approx -20$ кГц частота центрального максимума была 1,8 Гц. Спектр здесь наиболее узкий без каких-либо сильно выделяющихся боковых максимумов. Весь объём полученных к настоящему времени данных показывает, что в других сеансах нагрева ионосферной плазмы уширение спектра могло быть симметричным или проходить с большим уширением в сторону отрицательных ΔF , а также, что иногда небольшое уширение спектра регистрировалось и при $\delta f \approx -20$ кГц. Кроме того, характерной чертой этих измерений является большая изменчивость формы спектра от сеанса к сеансу измерений и даже в течение одного сеанса при сохраняющихся внешних условиях их проведения.

Для рассмотренного выше сеанса измерений регистрация спектральных характеристик радиоволн, прошедших через возмущённую область ионосферы, выполнялась также с использованием сигналов московской станции точного времени РВМ на частоте 4996 кГц. На рис. 5б приведены спектры сигнала для двух сеансов нагрева: с началом в 16:30, когда величина отстройки δf была около -10 кГц, и в 17:06, когда величина δf была близка к 0. Хорошо видно, что, как и для представленных на рис. 5а данных, спектр для $\delta f \approx -10$ кГц показывает сильное уширение в сторону больших частот F , при этом максимальная спектральная интенсивность принимаемого сигнала

здесь почти на 10 дБ ниже по сравнению со случаем $\delta f = 0$. Другие измерения, выполненные как 26 августа 2010 года, так и во время иных экспериментов, показали, что при нагреве ионосферной плазмы вблизи частоты гирогармоники наиболее широкие спектры принимаемого сигнала чаще регистрировались при $\delta f \approx -10$ кГц и имели меньшие значения максимальной спектральной плотности мощности по сравнению с $\delta f \geq 0$. Также было получено, что дополнительные спектральные максимумы не появлялись в спектре принимаемого сигнала при $\delta f \geq 60$ кГц. Эти результаты являются свидетельством того, что появление максимумов спектральной плотности мощности в спектре рассеянного сигнала волны накачки является следствием проявления гирогармонических свойств взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой.

Рассмотренные в этом разделе результаты могут быть интерпретированы как появление компоненты сигнала, рассеянной на неоднородностях с размерами $l_{\perp} \geq 100 \div 200$ м, которые возбуждаются в возмущённой области ионосферы. При этом можно предположить, что наличие наиболее сильного рассеяния в области отстроек $\delta f \approx -(10 \div 40)$ кГц определяется более интенсивной генерацией мелкомасштабных неоднородностей немного ниже частоты четвёртой гирогармоники, а, следовательно, более интенсивной модификацией плазмы за счёт теплового её расслоения. Как следует из результатов исследований характеристик тепловых компонент ИРИ около $4f_{ce}$ [1, 2, 29], при $\delta f \approx -(20 \div 40)$ кГц в спектре излучения имеет место максимум интенсивности DM, генерация которого прямо связана с развитием мелкомасштабных неоднородностей. Если предполагать, что появление максимума в спектре рассеянного сигнала определяется направленным движением рассеивающих неоднородностей вдоль луча зрения, то для $\Delta F \approx 1 \div 2$ Гц получаем $V_{\parallel} \approx 60 \div 120$ м/с. В этом случае уширение спектра рассеянных сигналов появляется за счёт поперечного к лучу зрения движения неоднородностей, и при ширине спектра 0,4 Гц и при угловых размерах возмущённой области 20° получаем $V_{\perp} \approx 100$ м/с. Значение для скорости дрейфа рассеивающих неоднородностей 100 м/с является несколько завышенным, но вполне допустимым для вечерних условий наблюдений. Однако, оно не имеет, к сожалению, прямого подтверждения по данным ракурсного рассеяния, полученным в это же время в пункте Ростов-на-Дону, где доплеровское смещение частоты рассеянного сигнала на частоте 14 996 кГц за весь этот сеанс наблюдений было близко к 0 (его вариации не превышали 1 Гц). Это даёт верхнюю оценку юго-западной компоненты скорости дрейфа неоднородностей плотности плазмы $V_{др} \leq 14$ м/с, которая должна давать существенный вклад принимаемой в пункте Казань рассеянной компоненты сигнала. Кроме того, зарегистрированное появление спектральных максимумов со смещением их частоты относительно нерассеянной компоненты $\Delta F \approx 4 \div 6$ Гц потребовали бы для своего объяснения уже неправдоподобно большие значения скорости дрейфа неоднородностей.

В заключение заметим, что, согласно [30, 31], модификация F_2 -области на частотах волны накачки, близких к частотам гирогармонических резонансов, может приводить к искусственной ионизации плазмы и, следовательно, к изменению профиля плотности плазмы и к дополнительному доплеровскому сдвигу частоты рассеянных сигналов. Однако этот эффект в наших измерениях не контролировался, и о его величине сказать ничего нельзя.

Более детальный анализ всех полученных результатов измерений саморассеяния мощной радиоволны на искусственных ионосферных неоднородностях выходит за рамки данной работы и будет выполнен в последующих публикациях.

1.4. Зондирование сверхмелкомасштабных искусственных неоднородностей сигналами навигационных спутников системы GPS

Как было отмечено во введении, обнаружение генерации интенсивных сверхмелкомасштабных искусственных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 10 \div 20$ см в условиях, когда частота волны накачки

ки немного превышает частоту гирогармоники в области взаимодействия мощной радиоволны О-поляризации с плазмой, является сегодня одной из приоритетных задач экспериментальных исследований в области модификации ионосферной плазмы мощным коротковолновым радиоизлучением. Существование таких неоднородностей было предсказано в [4] на основе полученных в [3] результатов первых исследований эффекта уширения спектра сигналов ракурсного рассеяния радиоволн коротковолнового диапазона (см. раздел 2.1). Ясно, что для детектирования таких сверхмелкомасштабных неоднородностей нужно использовать радиоволны гигагерцового диапазона, в частности, можно использовать сигналы спутников навигационных систем GPS/ГЛОНАСС.

Первые такие измерения были выполнены в феврале 2008 года на стенде HAARP (Аляска, США), когда частота волны накачки была близка к третьей гармонике гирочастоты электронов [5]. В них выполнение соотношения $f_{ВН} \approx 3f_{ce}$ определялось, как и в наших экспериментах, по подавлению компоненты DM в спектре ИРИ и по уменьшению интенсивности сигнала ракурсного рассеяния на декаметровых неоднородностях. Эксперименты проводились в режиме работы стенда 10 с — излучение, 10 с — пауза. В этих измерениях удалось зарегистрировать в течение примерно 300 с быстрые вариации величины полного электронного содержания (ПЭС или ТЕС — total electron content — в английской транскрипции). Судя по представленным в [5] результатам измерений, включение волны накачки приводило к увеличению ТЕС на $0,01 \div 0,015$ TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$), когда линия на спутник проходила вблизи магнитного зенита. Эти данные позволяют оценить характерное время роста ТЕС как $2 \div 5$ с, а время его уменьшения не превышает 1 с. Авторы [5] делают заключение, что, хотя в этих экспериментах не было получено прямого доказательства обнаружения сверхмелкомасштабных неоднородностей, их влиянием можно объяснить такие важные экспериментальные факты, как короткое время релаксации приращения ТЕС и большие значения вариаций фазы принимаемого сигнала.

В наших экспериментах также проводились исследования возможного влияния таких сверхмелкомасштабных неоднородностей на вариации ТЕС, получаемые с помощью зондирования возмущённой области ионосферы GPS-сигналами. Измерения выполнялись, когда сечение луча на спутник по возмущённой области на высоте отражения мощной радиоволны проходило близко к магнитному зениту для волны накачки или к географическому магнитному зениту. Режим работы стенда выбирался 5 или 10 с — излучение, 5 или 10 с — пауза. Перед началом экспериментов с помощью ИРИ определялось значение частоты гирогармоники, и для модификации ионосферы выбиралась частота волны накачки на $20 \div 40$ кГц выше $4f_{ce}$, где, как было показано выше, гирогармонические эффекты проявляются наиболее сильно. Диаграмма направленности антенны стенда была наклонена на 12° к югу в область магнитного зенита для волны накачки с целью увеличения эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Особенности проведения зондирования возмущённой области ионосферы в условиях стенда «Сура» с помощью GPS-сигналов рассмотрены в [33].

На рис. 6а приведён пример зарегистрированных 22 марта 2010 года наиболее интенсивных быстрых вариаций ТЕС, когда волна накачки излучалась на частоте 5435 кГц ($\delta f \approx 20 \div 30$ кГц) с $P_{эфф} = 120$ МВт в режиме 10 с — излучение, 10 с — пауза. Значение $f_{0F_2} \approx 6,2$ МГц, т. е. измерения выполнялись в условиях, когда волна накачки отражалась достаточно близко к максимуму F_2 -слоя ионосферы. Хорошо видно, что, начиная с 14:50 MSK, в течение 1 мин наблюдаются резкие периодические уменьшения ТЕС на величину $0,03 \div 0,05$ TECU. Важно отметить, что в это время луч из приёмного пункта на спутник проходил практически вдоль силовых линий геомагнитного поля. Сопоставление зарегистрированных вариаций ТЕС с режимом включения волны накачки позволяют заключить, что уменьшение ТЕС начинает проявляться через $3 \div 4$ с после её включения, имеет характерное время развития около 1 с, что, в целом, совпадает с характером развития декаметровых неоднородностей; время релаксации возмущений ТЕС, как и в [5],

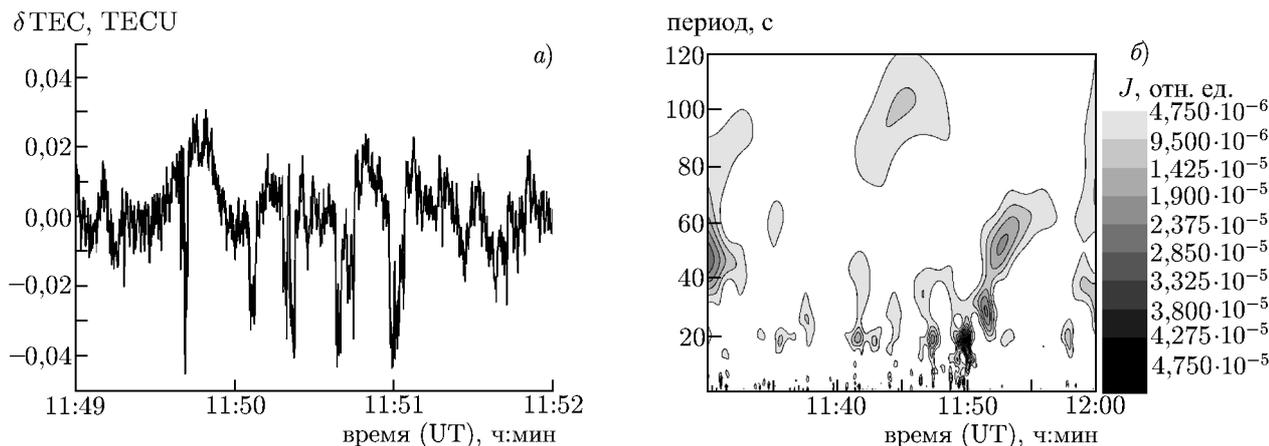


Рис. 6. Пример зарегистрированных 22 марта 2010 года наиболее интенсивных быстрых вариаций δ , когда волна накачки излучалась на частоте 5435 кГц ($\delta f \approx 20 \div 30$ кГц) с $P_{\text{эфф}} = 120$ МВт в режиме 10 с — излучение, 10 с — пауза (а). На панели (б) для представленного на панели а сеанса измерений, но только для более широкого интервала времени с 14:30 до 15:00 MSK, приведён спектр вэйвлет-преобразования вариаций ТЕС

не превышает 1 с, что намного меньше времени релаксации декаметровых неоднородностей и по нашим измерениям соответствует времени релаксации широкополосной компоненты рассеяния (см. раздел 1.1).

На рис. 6б для представленного на рис. 6а сеанса измерений, но только для более широкого интервала времени с 14:30 до 15:00 MSK, приведён спектр вэйвлет-преобразования вариаций ТЕС (использовался вэйвлет Морле). Отметим, что в этом сеансе до 14:47 MSK волна накачки излучалась на частоте 5415 кГц ($\delta f \approx 0 \div 10$ кГц). Из этих данных видно, что периодичность с $T \approx 20$ с хорошо обнаруживается в спектре сигнала, имея бóльшую интенсивность для отстроек $\delta f \approx 20 \div 30$ кГц с максимальной интенсивностью вариаций ТЕС в момент прохождения спутника через магнитный зенит. Важным свойством этой 20-секундной периодичности являются сильные вариации её интенсивности с характерным временем 1÷2 мин, что соответствует пространственному масштабу вариаций ТЕС на уровне отражения волны накачки порядка 3 км. Следует отметить, что измерения вариаций ТЕС на двух приёмниках, пространственно разнесённых на 600 м по линии восток—запад, показали их достаточно сильное отличие. Это может свидетельствовать о том, что пространственный радиус корреляции таких быстрых вариаций плотности плазмы не превышает 0,5 км. Группировка мелкомасштабных неоднородностей в плети с поперечными размерами около 1 км была обнаружена экспериментально в [34], и объяснена теоретически в [35]. Такая группировка неоднородностей может объяснить периодически появляющиеся в течение до 10 мин пространственные вариации ТЕС.

Сделаем некоторые оценки. Согласно [15], продольные масштабы декаметровых неоднородностей, которые должны содержать в себе сверхмелкомасштабные неоднородности, не превышают значений 10÷20 км. Взяв для оценки значение вариаций ТЕС порядка 0,03 TECU и $l_{\parallel} \approx 20$ км, получаем величину относительного изменения концентрации плазмы по лучу зрения порядка 4%, что, в целом, соответствует полученным в [5] данным. Однако, как и в [5], следует признать, что такие значения вариаций плотности плазмы для декаметровых неоднородностей на порядок или даже больше превышают их возможные усреднённые по возмущённой области значения, полученные методом ракурсного рассеяния радиоволн вне областей гирогармонических резонансов [15, 16]. Поскольку нет оснований считать неоднородности значительно более сильно вытянутыми, можно только предполагать, что в области магнитного зенита для волны накачки

с учётом группировки неоднородностей в плети и их малой интенсивности вне их, максимальная интенсивность декаметровых неоднородностей может достигать $5 \div 10\%$ от окружающей плотности плазмы. Однако следует признать, что вопросы, касающиеся пространственного распределения декаметровых неоднородностей по возмущённой области ионосферы и их интенсивности, нуждаются в дальнейшем более тщательном исследовании.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующую эмпирическую модель широкополосной компоненты сигналов ракурсного рассеяния на декаметровых искусственных неоднородностях при модификации F_2 -области ионосферы мощными короткими радиоволнами О-поляризации при их вертикальном или почти вертикальном распространении в условиях, когда частота волны накачки близка к четвёртой гармонике гирочастоты электронов в области её взаимодействия с плазмой.

1) Максимальное уширение спектра рассеянного сигнала имеет место при отстройке частоты мощной радиоволны $\delta f_m = f_{ВН} - 4f_{ce} \approx 20 \div 60$ кГц, где наблюдается генерация наиболее интенсивной широкополосной компоненты ИРИ в области положительных отстроек относительно $f_{ВН}$, известной как медленный BUM (или BUM-2) [11]. Значение δf зависит (см. ниже) от условий проведения измерений. Важно отметить, что заметное уширение спектра рассеяния имеет место уже при $\delta f \approx 0$; оно исчезает, начиная с $\delta f \approx -20$ кГц. Выше δf_m ширина спектра рассеянной компоненты сигнала плавно уменьшается. Однако она не исчезает, даже когда BUM-2 уже не наблюдается в спектре ИРИ. Можно предположить, что область её существования захватывает и область генерации BUS (broad up-shifted structure) — компоненты ИРИ, генерация которой также наблюдается в широкой области положительных отстроек до частот $f_{ВН} = 4,5 \div 4,7$ МГц [36].

2) Для рассеяния на декаметровых искусственных неоднородностях с $l_{\perp} \approx 9 \div 11$ м при эффективной мощности волны накачки $P_{эфф} \approx 150$ МВт ширина спектра ΔF в его стационарном состоянии может достигать 10 Гц в оптимальных условиях проведения измерений, когда они выполняются в вечерние или ночные часы, поверхность ракурсного рассеяния проходит через область магнитного зенита для волны накачки, где развиваются наиболее интенсивные мелко-масштабные неоднородности, а частота $f_{ВН}$ лишь немного ниже критической частоты F_2 -слоя ионосферы f_{0F_2} . Отмечается, что сразу после начала модификации ширина спектра может быть несколько больше её устанавливающегося при длительном нагреве значения.

3) Спектральная интенсивность широкополосной компоненты рассеяния S экспоненциально уменьшается с ростом отстройки от принимаемой частоты зондирующей волны ($S \propto \exp(-\alpha |F|)$) с изменяющейся в широких пределах скоростью спада от 2 до 20 дБ/Гц для $f = 14996$ кГц ($l_{\perp} \approx 11$ м) в зависимости от условий проведения измерений. Спектр широкополосной компоненты рассеяния, как правило, имеет несимметричную форму чаще с более быстрым спаданием (с большими значениями коэффициента α) в области для положительных значений F .

4) Наблюдается эффект гистерезиса в зависимости ΔF от δf , когда на ветви уменьшения величины отстройки от гирорезонанса после достижения δf_m ширина спектра широкополосной компоненты рассеяния ΔF имеет большие значения, чем на ветви её увеличения с началом при $\delta f \leq 0$. Это относится к измерениям, когда переход с одной частоты волны накачки на другую осуществлялся через паузу излучения $15 \div 30$ с. Если переход осуществлялся без таких пауз, то эффект гистерезиса или не обнаруживался, или оказывался не так сильно выраженным.

5) В оптимальных условиях проведения измерений при использовании коротких пауз между импульсами излучения волны накачки характерное время развития широкополосной компоненты спектра рассеянного сигнала составляет $0,3 \div 0,5$ с, как и для декаметровых искусственных

неоднородностей, а время её релаксации — $0,4 \div 0,9$ с. При этом уменьшение интенсивности широкополосной компоненты рассеяния на стадии её релаксации определяется быстрым обужением спектра принимаемого сигнала с темпом $3 \div 5$ Гц/с (т. е. более быстро для его более высокочастотных спектральных компонент). Время релаксации широкополосной компоненты рассеяния оказывается более чем на порядок меньше времени релаксации декаметровых искусственных неоднородностей вне областей гирогармонических резонансов, которое составляет порядка 8 с и соответствует времени релаксации узкополосной компоненты рассеяния, регистрируемой при $\delta f < 0$. Необходимо отметить, что полученное в наших измерениях время релаксации для широкополосной компоненты рассеяния на порядок больше приведённого в [3] значения $0,05 \div 0,07$ с. Возможно, оно было там оценено по времени исчезновения высокочастотных спектральных компонент рассеянного сигнала.

6) С приближением частоты волны накачки к f_{0F_2} наблюдается рост до $2 \div 4$ раз величины уширения спектра рассеянного сигнала. Эффект уширения спектра рассеянного сигнала наблюдается и в условиях, когда $f_{ВН}$ немного превышает f_{0F_2} , но когда частота верхнегибридного резонанса для волны накачки остаётся ещё меньше f_{0F_2} и сохраняется возможность генерации искусственной ионосферной турбулентности за счёт развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости, как это наблюдалось, например, в [37].

7) При режиме пошагового (на 3 дБ) изменения мощности волны накачки без прерывания её излучения во времени в зависимости $\Delta F(P_{эфф})$ эффект гистерезиса отсутствует (либо значительно подавлен), а сама зависимость близка к степенной типа $\Delta F \propto (P_{эфф})^\beta$ с $\beta \approx 0,5 \div 0,8$. Заметим, что при изменении мощности волны накачки с шагом 9 дБ эффект гистерезиса уже обнаруживается с более слабой зависимостью ΔF от мощности волны накачки на ветви её уменьшения от максимального уровня. На основе полученных данных можно утверждать, что для $f_{ВН} \approx \approx 4f_{се}$ пороговая мощность излучения для генерации широкополосной компоненты рассеяния не превышает 5 МВт, соответствуя пороговой мощности генерации компоненты искусственного радиоизлучения BUM-2 [11].

8) В разных частях области рассеяния (или в разных частях возмущённой области ионосферы) зависимости $\Delta F(\delta f)$ и сами значения ΔF могут заметно отличаться. При этом выделяется область магнитного зенита для волны накачки, где наблюдается более сильное уширение спектра широкополосной компоненты рассеяния вместе с более интенсивной узкополосной компонентой рассеянного сигнала.

9) В условиях гирогармонической модификации ионосферной плазмы угловой спектр принимаемых рассеянных радиоволн по азимуту и по углу места оказывается более широким по сравнению со случаем, когда частота волны накачки находится вне области гирогармонического резонанса.

Теоретическая интерпретация генерации широкополосной компоненты сигнала ракурсного рассеяния при зондировании декаметровых искусственных неоднородностей в условиях, когда частота волны накачки была порядка или немного выше частоты гирогармоники электронов в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой F_2 -области ионосферы была предложена в [4]. Согласно развитой в [4] теории, это связано с генерацией сверхмелкомасштабных ($l_\perp \approx 10 \div 20$ см) вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностей плотности плазмы, которые порождаются верхнегибридными и бернштейновскими волнами, запертыми внутри декаметровых неоднородностей плотности плазмы. Эти волны возбуждаются в результате развития четырёхволновой параметрической неустойчивости мощной электромагнитной волны в магнитоактивной плазме, когда частота волны накачки оказывается немного выше частоты гирогармоники электронов (приблизительно в интервале частот $f_{ВН}$ до 100 кГц выше частоты гирогармоники — в области генерации BUM-2). Бернштейновские волны имеют стоячую структуру и

большую амплитуду электрического поля. Это приводит к образованию сверхмелкомасштабных неоднородностей плотности плазмы за счёт силы стрикционного давления. Заметим, что рассеяние бернштейновских волн на мелкомасштабных искусственных неоднородностях лежит в основе генерации компоненты ИРИ BUM-2 [38]. Модели генерации компоненты ИРИ BUS до сих пор не предложено.

Согласно сделанным в [4] оценкам, такие сверхмелкомасштабные неоднородности должны иметь относительные вариации плотности плазмы порядка 0,3%. Их генерация сопровождается сильным разогревом плазмы внутри декаметровых неоднородностей [13] и появлением её дрейфа в ортогональном к геомагнитному полю направлении. Последнее приводит к уширению спектра рассеянного сигнала до 3 Гц на частоте зондирования 15 МГц. Из наших измерений следует, что величина полуширины спектра рассеянного сигнала может достигать до 5 Гц при рассеянии на неоднородностях с $l_{\perp} \approx 10$ м.

По результатам наших измерений и измерений [5], чтобы служить объяснением данных зондирования возмущённой области сигналами GPS, декаметровые искусственные неоднородности в области магнитного зенита должны иметь вариации плотности плазмы до $5 \div 10\%$ от её фонового значения. С точки зрения современных знаний свойств искусственной ионосферной турбулентности, эта величина более чем на порядок больше возможных её значений. Для разрешения этой проблемы потребуются новые экспериментальные и теоретические исследования.

Как показали выполненные измерения (см. разделы 1.2 и 1.3), генерация неоднородностей с $l_{\perp} \approx 100 \div 200$ м также обладает гирогармоническими свойствами. Определение особенностей механизма их генерации является предметом отдельных исследований. В этой области ещё только идёт накопление и осмысление экспериментальных данных, которые мы получаем с помощью средств зондирования, развёрнутых в районе г. Казань на базе Приволжского федерального университета. Заметим, что, согласно [39], и более крупномасштабные неоднородности, вызывающие F -рассеяние на ионограммах вертикального зондирования ионосферы, также обладают гирогармоническими свойствами.

3. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В настоящей работе представлены результаты измерений только около 4-ой гирогармоники электронов. Это было связано с тем, что в последние годы критические частоты f_{0F_2} были слишком низкими, чтобы проводить измерения около более высоких гармоник. Исследования около частот более высоких гирогармоник ещё только предстоит выполнить для всех доступных на стенде «Сура» номеров $n = 5 \div 7$. Поскольку гирогармонические свойства ИРИ (в частности, свойства BUM и BUS) зависят от номера n , важно будет получить частотную зависимость свойств широкополосной компоненты рассеяния и сравнить её с аналогичными характеристиками ИРИ, что позволит уточнить характеристики эффекта уширения спектра рассеянных сигналов. Также предстоит исследовать возможное уширение спектра сигналов, рассеянных на метровых неоднородностях. Согласно [14], при рассеянии на неоднородностях с $l_{\perp} \approx 3$ м, когда частота $f_{\text{ВН}}$ была приблизительно на 300 кГц выше $4f_{\text{се}}$, в спектре рассеянного сигнала присутствовала широкополосная компонента с полосой до 30 Гц. Определяется ли она гирогармоническими свойствами рассеяния или хаотическим движением неоднородностей, как это предполагалось в [14], ещё предстоит выяснить. Кроме того, необходимо детально исследовать, не является ли проявлением гирогармонической зависимости обнаруженное в [32] уширение до $\Delta F \approx 5 \div 7$ Гц спектра ракурсно рассеянного сигнала КВ радиостанций при переходе к вечерним часам наблюдений, когда модификация ионосферы осуществлялась на частоте $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц, которая была приблизительно на 300 кГц выше частоты третьей гирогармоники.

Особо следует отметить тот факт, что при определении частоты гирогармоники мы пользовались критерием максимального подавления генерации DM-компоненты ИРИ. При этом также регистрировался минимальный уровень интенсивности узкополосной компоненты рассеяния (или интенсивности декаметровых неоднородностей). Однако, как было установлено в [2], частота гирорезонанса для излучения волны накачки в области её взаимодействия с плазмой находится на $8 \div 10$ кГц ниже частоты подавления DM. Это следует принимать во внимание при определении значения частоты гирогармоники. Ясно, что используемая при проведении наших измерений перестройка частоты $f_{\text{ВН}}$ с шагом 20 кГц не может дать точное (до нескольких кГц) определение частоты гирорезонанса. Для изучения тонких эффектов непосредственно в области гирорезонанса следует выбирать шаг меньше 5 кГц. Такие измерения планируется выполнить в ближайшем будущем.

Много вопросов остаётся также при рассмотрении достаточно неполных данных, полученных методом саморассеяния сигнала волны накачки на создаваемых самой мощной радиоволной искусственных неоднородностях. Один из них — возможность отдельной диагностики индуцированных при нагреве ионосферы направленных и хаотических движений плазмы в объёме возмущённой области ионосферы, как это предполагалось в [14]. Отметим, что индуцированное нагревом радиальное истечение плазмы из центра возмущённой области было обнаружено в экспериментах на стенде «Сура» с регистрацией ракурсно рассеянных сигналов на радиотелескопе УТР-2 (г. Харьков, Украина) [40]. Для решения всех этих вопросов предполагается в дальнейшем провести эксперименты, когда периоды времени излучения мощной радиоволны будут вместо пауз дополняться излучением волны малой мощности. Это позволит проследить динамику изменения спектра принимаемого сигнала волны накачки на стадии развития и релаксации неоднородностей. Кроме того, измерения на частоте РВМ 4996 кГц следует дополнить угломерными измерениями, что позволит выделить рассеянную компоненту сигнала и более детально изучить её характеристики.

На стенде «Сура» были проведены только первые эксперименты по обнаружению интенсивных сверхмелкомасштабных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 10 \div 20$ см с помощью GPS-зондирования, когда приёмник размещался непосредственно на стенде. Продемонстрировано, что наиболее сильные вариации ТЕС наблюдаются в условиях, когда линия приёмник—спутник была ориентирована вдоль силовых линий геомагнитного поля. Однако в этом случае она проходила через край возмущённой области. Очевидно, что наиболее оптимальная геометрия для таких наблюдений будет реализовываться, когда приёмный пункт будет смещён в плоскости геомагнитного меридиана на север от нагревного стенда так, чтобы силовая магнитная линия, на которой он будет находиться, проходила бы через область магнитного зенита для волны накачки — область с наиболее интенсивной искусственной ионосферной турбулентностью. Такие измерения также планируется выполнить в ближайшее время. Они важны и для решения вопроса, связанного с измеренной большой величиной вариаций ТЕС, на основе которых получаются слишком большие против ожидаемых значения вариаций плотности плазмы в декаметровых неоднородностях.

Особо следует подчеркнуть, что выполненные эксперименты показали значительное отличие свойств искусственной ионосферной турбулентности вблизи гирогармоник при $f_{\text{ВН}} \geq 4f_{\text{ce}}$ в зависимости от того, проводятся ли измерения с паузой при переходе с одной частоты волны накачки на другую, когда высокочастотная турбулентность успевает полностью релаксировать, а низкочастотная турбулентность ослабнуть, или такая перестройка происходит без пауз в излучении волны накачки, как это, например, использовалось в измерениях свойств ИРИ [41, 42]. Представленные в работе результаты экспериментов показывают, что эффекты последствия в таких измерениях могут играть определяющую роль. Вопросы, возникающие при интерпретации получаемых при этом экспериментальных данных, также ещё предстоит разрешить.

Авторы благодарят сотрудников стенда «Сура» за помощь в организации и проведении экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-02-00374, 10-05-01126, 11-05-01157), гранта Президента РФ МК-2544.2012.5, ФЦП «Геофизика» и Министерства образования и науки РФ (госконтракт 16.518.11.7066).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frolov V. L., Sergeev E. N., Ermakova E. N., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28, No. 16. P. 3103.
2. Sergeev E. N., Frolov V. L., Grach S. M., Kotov P. V. // *Adv. Space Res.* 2006. V. 38. P. 2518.
3. Ponomarenko P. V., Leyser T. B., Thide B. // *J. Geophys. Res. A.* 1999. V. 104, No. 5. P. 10081.
4. Gurevich A. V., Zybin K. P. // *Phys. Lett. A.* 2006. V. 358. P. 159.
5. Milikh G., Gurevich F., Zybin K., Secan J. // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. Art. no. L22102.
6. Фролов В. Л., Недзвецкий Д. И., Ямпольский Ю. М. и др. // Труды XXI Всерос. научной конф. по распространению радиоволн. 2005. Т. 2. С. 179.
7. Kagan L. M., Nicolls M. J., Kelley M. C., et al. // *J. Radiophys. Radio Astron.* 2006. V. 11, No. 3. P. 221.
8. Фролов В. Л., Болотин И. А., Урядов В. П. и др. // XXIII Всерос. научная конф. «Распространение радиоволн». 2011. Т. 2. С. 285.
9. Зализовский А. В., Кащеев С. Б., Ямпольский Ю. М. и др. // *Радиофизика и радиоастрономия.* 2004. Т. 9, № 3. С. 261.
10. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // *Электромагнитные волны и электронные системы.* 2010. Т. 15, № 5. С. 22.
11. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Kagan L. M., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 81, No. 8. P. 1630.
12. Leyser T. B., Thide B., Waldenvik M., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 1994. V. 99, No. 10. P. 19555.
13. Гуревич А. В. // *УФН.* 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
14. Коровин А. В., Насыров А. М., Проскурин Е. В., Ягнов Н. Н. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1982. Т. 25, № 3. С. 277.
15. Насыров А. М. *Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями.* Казань: Казанский ун-т, 1991.
16. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Metelev S. A., Sergeev E. N. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. V. 59, No. 18. P. 2317.
17. Ерухимов Л. М., Коровин А. В., Митяков Н. А. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1982. Т. 25, № 11. С. 1360.
18. Будько Н. И., Васьков В. В., Комраков Г. П. и др. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1989. Т. 29. С. 973.
19. Minkoff J., Kreppel R. // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. P. 2844.
20. Allen E. M., Thome G. D., Rao P. B. // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 9, No. 11. P. 905.
21. Фролов В. Л., Недзвецкий Д. И., Комраков Г. П. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2005. Т. 48, № 9. С. 743.
22. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 2003. V. 108, No. 4. P. 1141.
23. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Митяков Н. А., Фролов В. Л. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1978. Т. 21, № 12. С. 1738.
24. Болотин И. А., Фролов В. Л., Акчурин А. Д. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2012. Т. 55, № 1-2. С. 66.

25. Блаунштейн Н. Ш., Ерухимов Л. М., Урядов В. П. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1988. Т. 28, № 5. С. 693.
26. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967.
27. Дрешер А. М., Бочкарев В. В., Латыпов Р. Р. // XXIII Всерос. научная конф. «Распространение радиоволн». 2011. Т. 1. С. 330.
28. Petrova I. R., Vochkarev V. V., Teplov V. Yu., Sherstyukov O. N. // Adv. Space Res. V. 40, No. 6. P. 825.
29. Фролов В. Л., Недзвецкий Д. И., Сергеев Е. Н., Штуббе П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 12. С. 1013.
30. Белякова В. Н., Березин И. В., Васьков В. В. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т. 31, № 3. С. 466.
31. Grach S. M., Komrakov G. P., Yurishchev M. A., et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78, No. 5. P. 883.
32. Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 50, № 8. С. 669.
33. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Куницын В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 7. С. 421.
34. Kelley M. C., Arce T. L., Salowey J., et al. // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 17367.
35. Gurevich A., Fremouw E., Secan J., Zybin K. // Phys. Lett. A. 2002. V. 301. P. 307.
36. Frolov V. L., Ermakova V., Kagan L. M., et al. // J. Geophys. Res. A. 2000. V. 105, No. 9. P. 20919.
37. Leyser T. B., Thide B., Derblom H., et al. // J. Geophys. Res. A. 1990. V. 95, No. 10. P. 17233.
38. Huang J., Kuo S. P. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 19569.
39. Фролов В. Л., Недзвецкий Д. И., Урядов В. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 5. С. 367.
40. Koloskov A. V., Leyser T. B., Yampolski Yu. M., Beley V. S. // J. Geophys. Res. A. 2002. V. 107, No. 7. doi:10.1029/2001JA000154.
41. Carozzi T. D., Thide B., Grach S. M., et al. // J. Geophys. Res. A. 2002. V. 107, No. 9. P. 1253.
42. Котов П. В., Сергеев Е. Н., Грач С. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 6. С. 461.

Поступила в редакцию 12 мая 2012 г.; принята в печать 26 июня 2012 г.

GYROHARMONIC FEATURES OF THE IRREGULARITIES HF-INDUCED IN THE IONOSPHERE

*V. L. Frolov, I. A. Bolotin, G. P. Komrakov, G. G. Vertogradov, V. G. Vertogradov, E. G. Vertogradova,
A. D. Akchurin, V. V. Vochkarev, A. M. Dresher, E. Yu. Zykov, R. R. Latypov, I. R. Petrova,
K. M. Yusupov, V. E. Kunitsyn, A. M. Padokhin, and G. A. Kurbatov*

Gyroharmonic features of the different-scale artificial plasma-density irregularities excited by HF modification of the ionospheric F_2 -region under condition where the frequency of the O-mode pump wave is close to the forth gyroharmonic frequency of electrons in the pump wave – plasma interaction region are considered.