УДК 533.951+537.868

ЭФФЕКТЫ МОДИФИКАЦИИ ВЫСОКОШИРОТНОЙ *F*-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КОРОТКИМИ РАДИВОЛНАМИ НА ЧАСТОТАХ ВБЛИЗИ ПЯТОЙ И ШЕСТОЙ ГАРМОНИК ГИРОЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОНОВ

Т. Д. Борисова ¹ *, Н. Ф. Благовещенская ¹, А. С. Калишин ¹, М. Т. Риетвельд ², Т. К. Йоман ³, И. Хагстром ⁴

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия ² Европейская научная Ассоциация EISCAT, г. Тромсё, Норвегия ³ Лейстерский университет, г. Лейстер, Англия

 4 Европейская научная Ассоциация EISCAT, г. Кируна, Швеция

Исследованы эффекты модификации высокопиротной *F*-области ионосферы при воздействии на неё мощной короткой радиоволны с обыкновенной поляризацией, излучаемой в направлении магнитного зенита на частотах вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов (использовался нагревный стенд EISCAT/Heating). Анализ наблюдаемых явлений выполнен по данным измерений на радаре некогерентного рассеяния EISCAT (частота радара 930 МГц) в г. Тромсё, Норвегия, когерентном радаре CUTLASS в Финляндии и приёмном комплексе для регистрации искусственного радиоизлучения ионосферы в г. Тромсё. Детально исследовано поведение параметров ионосферной плазмы (концентрации и температуры электронов), мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, спектров плазменных и ионных линий и искусственного радиоизлучения ионосферных проческой (резонансной) неустойчивостью возникают параметрическая распадная (стрикционная) и/или осциллирующая двухпотоковая неустойчивости. Возбуждение неустойчивостей происходит на высотах, близких к высоте отражения волны накачки и высоте верхнего гибридного резонанса.

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие мощного коротковолнового радиоизлучения с обыкновенной поляризацией (Ополяризация) на ионосферную плазму в областях их резонансного взаимодействия сопровождается комплексом явлений. При определённых условиях в ионосфере реализуется двойной резонанс. На высотах, где частота излучения нагрева $f_{\rm H}$, верхняя гибридная частота $f_{\rm UH}$ и частота, кратная гирочастоте электронов, совпадают: $f_{\rm H} = f_{\rm UH} = n f_{\rm ce}$, где

$$f_{\rm UH} \approx (f_{\rm plasm}^2 + f_{\rm ce}^2)^{1/2},$$
 (1)

 $f_{\rm plasm}$ — плазменная частота ионосферы и $f_{\rm ce}$ — гирочастота электронов на высоте верхнего гибридного резонанса $h_{\rm UH}$ [1–6]. Явлениям, возникающим в ионосфере при модификации мощными короткими радиоволнами с частотами, близкими к частотам двойных резонансов, посвящены многочисленные исследования (см. [1–8] и цитируемую там литературу). Характеристики процессов, регистрируемых при воздействии вблизи двойного резонанса, существенно зависят от номера гармоники n.

Исследования нелинейного взаимодействия мощной нагревной волны с ионосферной плазмой при приближении частоты волны накачки $f_{\rm H}$ к гармоникам гирочастоты электронов $nf_{\rm ce}$ активно продолжаются и в настоящее время. Например, в экспериментах на нагревном стенде HAARP при

^{*} borisova@aari.ru

воздействии на ионосферу мощных радиоволн на частотах, близких к 4-ой гармонике частоты $f_{\rm ce},$ было обнаружено и исследовано образование слоя искусственной ионизации, опускающегося от уровня отражения волны накачки на 5÷30 км (до высот локального двойного резонанса) [9, 10]. На том же стенде при нагреве на частотах возле третьей и четвёртой гармоник электронной гирочастоты исследовались спектры искусственного радиоизлучения ионосферы в диапазоне частот ионных акустических волн и около гармоник ионной гирочастоты [11]. На стенде «Сура» изучалась генерация искусственных ионосферных неоднородностей различных масштабов, возбуждаемых при модификации F2-области ионосферы волной накачки с частотой, близкой к четвёртой гармонике гирочастоты электронов, в области взаимодействия мощной короткой радиоволны обыкновенной поляризации с плазмой [5]. На стенде EISCAT выполнялись исследования при воздействии в окрестности третьей [12] и четвёртой гармоник гирочастоты [13]. В частности, в работе [13] представлены результаты исследований эффектов модификации высокоширотного слоя ионосферы F2 при воздействии на неё мощной короткой радиоволны с обыкновенной поляризацией в окрестности четвёртой гармоники $f_{\rm H} \approx 4 f_{\rm ce}$ и показано, что одновременно могут возбуждаться как тепловая параметрическая (резонансная), так и параметрическая распадная (стрикционная) неустойчивости.

В данной работе продолжено исследование особенностей поведения ионосферной плазмы в высокоширотном слое ионосферы F_2 при нагреве мощными короткими радиоволнами с О-поляризациейи в направлении магнитного поля Земли (стенд EISCAT/Heating в г. Тромсё, Норвегия) на частотах в окрестностях пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов. Основное внимание уделено анализу данных, полученных при использовании радара некогерентного рассеяния радиоволн в г. Тромсё. Детально исследовано как поведение параметров ионосферной плазмы (температуры и концентрации электронов), так и спектров плазменных и ионных линий. Отметим, что появление в спектрах некогерентного рассеяния инициированных нагревом плазменных (HF-induced plasma lines, HFPL) и усиленных ионных (HF-enhanced ion lines, HFIL) линий является прямым доказательством возбуждения параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости. Также сравниваются эффекты, возникающие при воздействии вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты. При анализе данных радара использованы результаты одновременных измерений спектров искусственного радиоизлучения ионосферы в килогерцовом диапазоне частот и характеристик мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с различными пространственными масштабами.

1. ОПИСАНИЕ ПРОВЕДЁННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования эффектов модификации высокопиротной ионосферы на частотах излучения нагрева $f_{\rm H}$ в окрестностях пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов ($f_{\rm H} \approx n f_{\rm ce}$, где n = 5, 6) были выполнены в октябре 2013 года на коротковолновом нагревном комплексе EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия). Излучение мощных коротких радиоволн с О-поляризацией проводилось в направлении магнитного зенита (наклон диаграммы направленности излучающей антенны составлял 12° к югу от вертикали, азимут — 185°). В экспериментах использовалась фазированная антенная решётка № 1 (ширина диаграммы направленности 5°÷6°), обеспечивающая на частотах 6,7÷8,0 МГц эффективную мощность излучения порядка 640 МВт [14]. Комплекс работал циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза. В течение цикла нагрева каждые 20 с частота волны накачки $f_{\rm H}$ увеличивалась на 5 кГц, что обеспечивало проход диапазона частот нагрева 295 кГц.

Диагностика явлений при воздействии вблизи двойных резонансов проводилась с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн с частотой 930 МГц в г. Тромсё [15], коротковолно-

Таблица 1. Общая характеристика экспериментов, выполненных на коротковолновом нагревном
комплексе EISCAT/Heating в октябре 2013 года при нагреве высокоширотной F -области ионосферы
на частотах накачки вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов, $f_{\rm H} pprox n f_{ m ce} \; (n=5,6);$
22.10.2013 измерения искусственного радиоизлучения ионосферы не проводились

Дата,	Время	Диапазон	Номер	$f_{0F_2},$	Время	Частота	Высота	Высота
W	начала	изменения	гармоники	ΜΓц	наблюдения	двойного	двойного	$h_{\rm R}$ HFIL,
	цикла	$f_{\rm H}, {\rm M} \Gamma$ ц	гирочастоты		двойного	резонанса,	резонанса,	KM
	нагрева		электронов		резонанса,	$f_{\rm HR}, {\rm M} \Gamma$ ц	$h_{\rm R_модель},$	
	(UT), ч:мин		n		$t_{\rm R}$ (UT),		KM	
					ч:мин:с			
22.10,	12:01	$7,950 \div 8,245$	6	9,75	—	—	_	224
179	13:01	$7,950 \div 8,245$	6	10,35	—	—	—	220
	14:01	8,000÷8,300	6	9,55	—	—	—	221
	14:31	$6,600 \div 6,895$	5	9,10	—	—	—	214
	15:01	$6,700 \div 6,995$	5	8,90	—	—	—	217
23.10,	12:01	$6,700 \div 6,995$	5	10,10	12:11:20	6,855	204	203
228	12:31	$6,700 \div 6,995$	5	9,85	12:41:00	6,850	206	206
	13:01	$6,700 \div 6,995$	5	9,50	13:10:20	6,840	209	209
	13:31	$6,700 \div 6,995$	5	9,50	13:40:20	6,840	209	212
25.10,	14:01	$6,700 \div 6,995$	5	$9,\!60$	14:10:40	6,845	207	207
148	14:31	$6,700 \div 6,995$	5	8,60	14:40:20	6,840	209	209
	15:01	$6,700 \div 6,995$	5	8,10	15:09:00	6,820	214	215
26.10,	14:01	$6,700 \div 6,995$	5	8,80	14:10:00	6,835	210	210
148	14:31	$6,700 \div 6,995$	5	8,30	14:38:40	6,815	219	220
27.10,	14:01	$8,000 \div 8,295$	6	9,35	14:12:00	8,165	222	224
171	14:31	$7,950 \div 8,245$	6	8,50	14:43:00	8,130	232	230
28.10,	14:01	$7,950 \div 8,245$	6	8,80	14:13:00	8,130	232	232
206	14:36	$7,950 \div 8,245$	6	8,00	14:49:00	8,070	250	250
29.10,	14:01	$7,950 \div 8,245$	6	9,50	14:15:00	8,160	223	222
155	14:31	$7,950 \div 8,245$	6	8,20	14:41:00	8,100	240	238

вого радара CUTLASS (сеть SUPERDARN) в Финляндии, работавшего на частотах 13 (только 22.10.2013); 16; 18 и 20 МГц [16], комплекса для регистрации спектров искусственного радиоизлучения ионосферы в г. Тромсё, приёмного многоканального коротковолнового доплеровского комплекса для регистрации диагностических коротковолновых радиосигналов методом ракурсного рассеяния [4], установленного в обсерватории ААНИИ «Горьковская» под г. Санкт-Петербург, и ионозонда вертикального зондирования в г. Тромсё. Краткое описание используемых методов и средств, а также карта-схема, поясняющая геометрию проведения экспериментов с использованием нагревного стенда EISCAT/Heating, приведены в работе [13].

В табл. 1 представлена обобщённая характеристика экспериментов по воздействию в окрестности пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов, выполненных в октябре 2013 года. Приведены даты проведения экспериментов, время начала каждого 20-минутного цикла нагрева, диапазон изменения частот в цикле нагрева, номер гармоники гирочастоты n, значения критической частоты F_2 -слоя f_{0F_2} непосредственно перед циклом нагрева. Дополнительно в табл. 1 показан ряд параметров, определённых в процессе обработки и анализа данных: время наблюдения эффектов по данным искусственного радиоизлучения ионосферы t_R , частота нагрева $f_{\rm HR}$ в момент времени t_R , высоты возникновения гирорезонансов $h_{\rm R_MOZED}$, рассчитанные по модели высотного распределения гирочастоты электронов $f_{\rm ce}(h)$ [17], и высоты возбуждения усиленных нагревом ионных линий HFIL $h_{\rm R_HFIL}$, определяемые по данным радара некогерентного рассеяния.

В октябре 2013 года наблюдалась высокая солнечная активность. Характеризующие её еже-

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.



Рис. 1. Вариации критических частот ионосферного слоя F_2 в период проведения нагревных экспериментов в г. Тромсё в октябре 2013 года (конкретные даты указаны на рисунке). На оси времени отмечены интервалы излучения нагревного комплекса EISCAT/Heating

дневные числа Вольфа W изменялись от 148 до 228 [18]. Значения W указаны в табл. 1 вместе с датой. Магнитная активность в дни проведения экспериментов была низкой. Значения трёхчасового планетарного индекса $K_{\rm p}$ [19] находились около 0 (сумма $K_{\rm p}$ за сутки, $\Sigma K_{\rm p}$, примерно равнялась 3), за исключением 22.10.2013, когда $K_{\rm p} \approx 2$ ($\Sigma K_{\rm p} \approx 9$). По данным измерений ионозонда вертикального зондирования ионосферы в г. Тромсё в периоды экспериментов критические частоты F_2 -слоя (f_{0F_2}) были высокими и изменялись в пределах от 7,5 до 10 МГц. Отметим, что 23.10.2013 в период 12:00÷13.30 UT в ионосфере наблюдалось повышенное поглощение, которое вызвало увеличение минимальных частот отражений от слоя F_2 от 2 до 4 МГц.

На рис. 1 приведены временны́е изменения критических частот f_{0F_2} для дней проведения экспериментов в октябре 2013 года, указанных в табл. 1. Можно видеть, что перед началом нагревных циклов в подавляющем большинстве случаев частота излучения комплекса EISCAT/Heating $f_{\rm H}$ была ниже частоты f_{0F_2} .

В октябре 2013 года регистрация искусственного радиоизлучения ионосферы осуществлялась в килогерцовом диапазоне частот отстроек относительно частоты нагрева $f_{\rm H}$ от -50 кГц до 150 кГц на аппаратуре комплекса EISCAT/Heating. Данные измерений позволяли регистрировать такие спектральные компоненты искусственного радиоизлучения ионосферы, как максимум, сдвинутый в область отрицательных отстроек от частоты нагрева (downshifted maximum, DM) и широкий максимум, сдвинутый в область положительных отстроек (broad upshifted maximum,

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.

BUM). Время $t_{\rm R}$ возникновения двойных резонансов на пятой и шестой гармониках гирочастоты электронов и соответствующее значение частоты нагрева $f_{\rm HR}$, представленные в табл. 1, определялись по максимальному подавлению интенсивности компоненты DM в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

2.1. Данные радара некогерентного рассеяния радиоволн в октябре 2013 года

В период проведения нагревных экспериментов радар некогерентного рассеяния EISCAT (г. Тромсё) работал в диапазоне высот от 90 до 600 км с разрешением по высоте 1,5 км и по времени 5 с. Луч радара был ориентирован в направлении магнитного поля Земли, как и направление излучения мощной радиоволны. Отметим, что высоты, определяемые по данным радара, приведены вдоль линии наблюдения: $h = h_{\text{Radar}} = h_{\text{Vert}}/\cos 12^{\circ}$. Первичные данные измерений радара были обработаны с помощью унифицированного комплекса программ GUISDAP [20] для вычислений параметров ионосферной плазмы (электронной концентрации N_e и температуры T_e). Распределения величин N_e и T_e по времени t и высоте определялись с шагом интегрирования по времени 20 с (интервал постоянства частоты нагрева $f_{\rm H}$) и с переменным шагом по высоте h (от 3 до 15 км).

С помощью радаров некогерентного рассеяния радиоволн можно непосредственно регистрировать плазменные волны в низкочастотном (ионно-акустические волны) и высокочастотном (моды Ленгмюра) диапазонах. Для максвелловской плазмы (т. е. плазмы в тепловом равновесии) спектр некогерентного рассеяния в низкочастотной области, как правило, имеет два максимума, смещённых относительно нулевой частоты в «отрицательную» и «положительную» области, что соответствует ионно-акустическим волнам, направленным «от» радара и «к» радару соответственно (down- и up-shifted ion lines). Величина доплеровского смещения максимумов относительно нуля зависит от частоты излучения радара и для радара в г. Тромсё, работающего на частоте 930 МГц, на высотах F-области ионосферы это смещение составляет порядка ± 10 кГц (без учёта затухания Ландау). В спектре некогерентного рассеяния в г. Тромсё представлены плазменные волны, направленные только «от» радара (downshifted). В нагревных экспериментах радар некогерентного рассеяния позволяет регистрировать усиленные нагревом ионные линии (HF-enhanced ion lines, HFIL) и инициированные нагревом плазменные линии (HF-induced plasma lines, HFPL). Как известно [21–24], возбуждение линий HFIL и HFPL является прямым указанием на развитие параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости (parametric decay instability, PDI) на высотах вблизи отражения мощной короткой радиоволны от ионосферы. На основе дополнительных возможностей GUISDAP по первичным данным радара проведены расчёты спектральной мощности рассеянных сигналов в высокочастотном и низкочастотном диапазонах для исследования особенностей поведений инициированных нагревом плазменных и усиленных ионных линий. Графическое представление результатов интегрирования выполнено в средах «MatLab» или GUISDAP. При анализе использовались только данные, достоверность которых подтверждалась параметром Residual<2 [20]. Достоверные значения спектральных мощностей рассчитаны с постоянным шагом по высоте 3 км и по времени 20 или 40 с.





Рис. 2. Высотно-временно́е распределение электронной концентрации $N_{\rm e}$ (*a*), температуры электронов $T_{\rm e}$ (*б*) в диапазоне высот от 130 до 550 км и мощности рассеянных сигналов («сырых» значений концентрации электронов $N_{\rm e}$) в диапазоне высот от 130 до 278 км с разрешением по высоте порядка 1,5 км (*b*) по данным радара некогерентного рассеяния в г. Тромсё (частота 930 МГц) в период эксперимента 25 октября 2013 года. Частота мощной радиоволны с О-поляризацией изменялась вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов. Соответствующие спектрограммы искусственного радиоизлучения ионосферы представлены на панели (*z*). Циклы излучения указаны на оси времени. На спектрограммах положение полосы искусственного радиоизлучения ионосферы на оси ординат представлено со смещением по оси частот, чтобы максимум в спектре на частоте нагрева $f_{\rm H}$ в любой момент отсчёта соответствовал $\Delta f = 0$

2.1.1. Результаты наблюдений радаром некогерентного рассеяния при воздействии в окрестности пятой гармоники гирочастоты электронов

Из табл. 1 можно видеть, что модификация высокоширотной ионосферы 22, 23, 25 и 26 октября 2013 года на частотах накачки $f_{\rm H} \approx 5 f_{\rm ce}$ проходила в условиях отражения мощной короткой радиоволны с обыкновенной поляризации от ионосферного слоя F_2 , $f_{\rm H} < f_{\rm oF_2}$. В 20-минутном интервале нагрева частота $f_{\rm H}$ изменялась в диапазоне от 6,700 до 6,995 МГц или от 6,600 до 6,895 МГц, увеличиваясь на 0,005 МГц каждые 20 с.

В качестве типичного примера результатов радарных измерений для экспериментов с частотой $f_{\rm H} \approx 5 f_{\rm ce}$ на рис. 2 показаны высотно-временны́е распределения концентрации $N_{\rm e}$ (рис. 2*a*) и температуры $T_{\rm e}$ (рис. 2*b*) электронов, полученные 25 октября 2013 года с 14:00 до 15:25 UT в диапазоне высот от 130 до 550 км. На рис. 2*b* приведены высотно-временны́е распределения первичных значений концентрации электронов $N_{\rm e_raw}$ (мощности рассеянных сигналов) с разрешением по высоте порядка 1,5 км.

Для определения моментов прохождений двойных резонансов при изменении частоты нагрева

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.

 $f_{\rm H}$ использовались результаты одновременных измерений спектров искусственного радиоизлучения ионосферы. На рис. 2г приведены спектрограммы искусственного радиоизлучения ионосферы в анализируемый период времени 14:00÷15:25 UT 25.10.2013. Данные по радиоизлучению регистрировались в основном с шагом по времени $9 \div 12$ с, кроме интервала времени $14:02 \div 14:08$ UT, когда измерения были выполнены с бо́льшим шагом (1,5÷2,0 мин). Спектрограммы искусственного радиоизлучения ионосферы представлены в диапазоне частот отстроек -40÷120 кГц относительно частоты накачки f_H. На рис. 2г в интервале нагрева с 14:31 до 14:51 UT отмечены спектральные компоненты DM и BUM, на поведение которых влияет соотношение между частотами $f_{\rm H}$, $f_{\rm UH}$ и $nf_{\rm ce}$ [1–3]. При нагреве на частоте $f_{\rm H} = f_{\rm HR} \approx f_{\rm UH} \approx nf_{\rm ce}$ DM-компонента подавляется, и начинает формироваться BUM-компонента спектра. Частота $f_{\rm HR}$ принята за частоту двойного резонанса на пятой (или шестой) гармонике гирочастоты электронов. Обозначим частоту накачки $f_{\rm H}$, на которой наблюдается максимум интенсивности DM-компоненты, как $f_{\rm HDM\,max}$ (условия нагрева на частотах ниже двойного резонанса, $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$) и $f_{\rm HDM\,max}$ – частоту накачки, на которой регистрируется максимум интенсивности BUM-компоненты (при нагреве на частотах $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$). Отметим, что на частотах выше двойного резонанса, когда интенсивность BUM-компоненты достигала максимальных значений ($f_{\rm H} > f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} \approx f_{\rm HBUM\,max}$) наблюдался рост интенсивности DM-компоненты.

Рисунок 2*a* демонстрирует резкое возрастание электронной концентрации $N_{\rm e}$ примерно на 50% (по сравнению с уровнем в течение первых минут цикла нагрева) в широком диапазоне высот, бо́льших высоты отражения мощной радиоволны $h_{\rm orpO}$ и максимума слоя F_2 ($h_{\rm m}F_2 \approx 270$ км), вплоть до высот порядка 550 км. В трёх нагревных циклах 25.10.2013 указанные возрастания концентрации $N_{\rm e}$ начинались около 14:09, 14:38 и 15:07 UT на фоне спада интенсивности DM-компоненты на частотах излучения ниже двойного резонанса $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} \approx f_{\rm HDM\,max} + 5\div15$ кГц и продолжались до конца нагревного цикла. Отметим, что возрастания концентрации $N_{\rm e}$ в более узком диапазоне высот около высоты отражения мощной радиоволны ранее также наблюдались в экспериментах на нагревном комплексе EISCAT/Heating в г. Тромсё, когда частота нагрева была близка к третьей и четвёртой гармоникам гирочастоты электронов и критическим частотам слоя F_2 [12, 13, 25].

Из рис. 26 следует, что при нагреве на частотах $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR} \approx 5f_{\rm ce}$ наблюдалось значимое уменьшение температуры электронов $T_{\rm e}$ на 1500÷2500 K в интервале высот 50÷70 км как ниже, так и выше максимума F_2 -слоя ионосферы. Спад температуры $T_{\rm e}$ начинался на частотах $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} \approx f_{\rm HDM\,max} + 15\div25$ кГц. Уменьшение температуры $T_{\rm e}$ продолжалось при изменении частоты $f_{\rm H}$ от $f_{\rm HDM\,max} + 15\div25$ кГц до $f_{\rm HR} + 45\div75$ кГц (изменение составило 60÷100 кГц, что соответствует 4 – й÷6 – й минутам нагревного цикла). Верхняя граница уменьшения $T_{\rm e}$ по частоте $f_{\rm H}$ соответствует частотам $f_{\rm H} \approx f_{\rm HBUM\,max}$, при которых наблюдался максимум интенсивности ВUM-компоненты и возрастание интенсивности DM-компоненты. Минимальные значения $T_{\rm e}$ регистрировались на частотах накачки, близких к двойному резонансу, $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$. На частотах выше области подавления $T_{\rm e}$ ($f_{\rm H} > f_{\rm HR} + 90\div120$ кГц) наблюдаемые максимальные значения температуры были на 1000÷1500 K ниже, чем для $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$. На фоне спада температуры $T_{\rm e}$ для частот накачки $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR} + 20\div50$ кГц на высотах вблизи $h_{\rm UH}$ наблюдались локальные кратковременные возрастания $T_{\rm e}$ на 1500÷2000 K. Отсутствие данных о температуре электронов на рис. 26 (белые пятна) на высотах слоя F_2 в представленных измерениях подтверждает наличие сильных неустойчивостей в ионосфере, когда сигналы радара становятся недостоверными и Residual ≥ 2 .

Анализ первичных значений концентрации $N_{raw}(t,h)$ (см. рис. 26) показывает, что при включении нагревного комплекса наблюдались кратковременные всплески линий HFIL. Это является типичным проявлением распадной (стрикционной) неустойчивости PDI по данным радара некогерентного рассеяния в нагревных экспериментах и не связано с эффектами при воздействии вблизи



Рис. 3. Данные измерений линий HFIL радаром некогерентного рассеяния в г. Тромсё при нагреве на частоте около пятой гармоники гирочастоты 25 октября 2013 года. Спектры HFIL на различных высотах, наблюдаемые при регистрации максимальной интенсивности DM-компоненты перед двойным резонансом (*a*), максимального подавления DM-компоненты (*б*) и максимальной интенсивности BUM-компоненты (*b*). Спектры представлены на трёх высотах, для которых относительные мощности максимумов $S_{\rm IL}$ были наибольшими для данного момента времени (высоты указаны на рисунке). На каждой панели для локальной высоты разными линиями приведены три спектра, измеренные через 20 с в одноминутном интервале. Интервал нагрева 14:01÷14:21 UT

гармоник гирочастот [22]. Интенсивные усиленные нагревом ионные линии (HFIL) в спектрах радара в октябре 2013 года на частотах накачки $f_{\rm H} \approx 5 f_{\rm ce}$ регистрировались на протяжении всех циклов нагрева. Спектральные мощности линий HFIL, $S_{\rm IL}$, превышали на 1÷2 порядка фоновые значения $S_{\rm IL}$, измеренные в паузах. При нагреве на частотах $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$ значения спектральных мощностей $S_{\rm IL}$ были выше, чем на частотах $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$. Наибольшие мощности $S_{\rm IL}$ наблюдались на частотах $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} \approx f_{\rm HDM\,max}$. Высота возбуждения линий HFIL ($h_{\rm HFIL}$) в цикле нагрева постепенно снижалась на 10÷12 км от начального уровня $h_{\rm HFIL}$ в моменты включения по мере изменения частоты $f_{\rm H}$ до значений около $f_{\rm HR} + 75÷90$ кГц. Последующий рост высоты $h_{\rm HFIL}$ начинался на частотах накачки $f_{\rm H} \approx f_{\rm HBUM\,max}$ и продолжался одновременно с понижением интенсивности ВUM-компоненты, нарастанием интенсивности DM-компоненты и температуры $T_{\rm e}$. К концу нагревного цикла высота $h_{\rm HFIL}$ увеличивалась на 4÷8 км относительно минимального уровня снижения. По высотному диапазону линии HFIL занимали область ±6 км от высоты с наибольшей мощностью ионных линий $S_{\rm IL}$. На фоне роста высоты $h_{\rm HFIL}$ после исчезновения

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.



Рис. 4. Временны́е вариации величин $S_{ILD}(a)$, $S_{IL0}(b)$ и $S_{ILU}(b)$ для различных высот (указаны на рисунках справа). Интервал нагрева 14:01÷14:21 UT 23.10.2013

BUM-компоненты $(f_{\rm H} > f_{\rm HR})$ можно видеть расширение диапазона высот возбуждений линий HFIL.

Из рис. 2*a*, б и в следует, что снижение высоты возбуждения ионных линий $h_{\rm HFIL}$ сопровождалось увеличением электронной концентрации $N_{\rm e}$ на высотах слоя F_2 . Минимальные значения $h_{\rm HFIL}$ регистрировались одновременно с максимальными значениями интенсивности BUMкомпоненты. Максимально высота трека линий HFIL понижалась на $8\div12$ км, что соответствует изменению гирочастоты электронов $f_{\rm ce}(h)$ примерно на $6\div7$ кГц и сопоставимо с величиной нижней гибридной частоты ионосферы.

На рис. 3 и 4 в качестве примера приведены результаты спектральной обработки в низкочастотном диапазоне данных радара некогерентного рассеяния для 25 октября 2013 года в цикле нагрева 14:01÷14:21 UT. На рис. 3 для трёх моментов времени показаны спектры ионноакустических линий на различных высотах в интервале частот ±20 кГц. Моменты наблюдений выбраны из условий максимальной интенсивности DM-компоненты искусственного радиоизлу-

чения ионосферы при $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} \approx f_{\rm HDM\,max}$ (рис. 3*a*), максимального подавления DMкомпоненты на частотах $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$ (рис. 36) и максимальной интенсивности BUM-компоненты для $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} \approx f_{\rm HBUM\,max}$ (рис. 36). Спектры мощности линий HFIL в нагревных экспериментах, как правило, представляют собой двугорбые кривые с максимумами, смещёнными относительно нулевой частоты в положительную (мощность в максимуме S_{ILU}), и в отрицательную (мощностью в максимуме S_{ILD}) область, а иногда с дополнительным несмещённым относительно нуля максимумом S_{IL0} . Отметим, что высоты, приведённые на рис. 3 на средних панелях, соответствуют высотам отражений нагревной волны и высотам верхнего гибридного резонанса (на частотах излучения волны накачки около 7 МГц высоты отражения hotpo и высоты верхнего гибридного резонанса $h_{\rm UH}$ в ионосфере близки при учёте наклона диаграммы направленности антенной решётки на 12°). Фоновые значения мощности S_{IL} в паузах между циклами нагрева составляли 50 \div 80 отн. ед. Из приведённых спектров можно видеть, что кроме максимумов $S_{\rm ILU}$ и S_{ILD} регистрировался несмещённый относительно нуля максимум S_{IL0} . Мощность S_{IL0} вблизи двойного резонанса превышала мощности боковых максимумов $S_{\rm ILU}$ и $S_{\rm ILD}$ на высотах выше $h_{\text{отрО}}$ (см. рис. 36, h = 211 км). На рис. 4 приведены временны́е вариации мощностей S_{ILD} , S_{ILD} и S_{ILU} для периода с 14:00 до 14:26 UT. На оси времени отмечен цикл нагрева и момент двойного резонанса на пятой гармонике гирочастоты электронов. Вариации приведены для четырёх ионосферных высот, т. к. расположение линий HFIL менялось во времени (см. рис. 26). С началом цикла нагрева по мере увеличения частоты накачки до $f_{\rm H} \approx f_{\rm HDM\,max}$ наблюдался уровень мощности S_{HFIL}, превышающий фоновые значения мощностей ионных линий на 1,5÷2,0 порядка. Максимальное усиление (мощности S_{ILD} , S_{IL0} и S_{ILU} превышают фоновые значения на 2,0÷2,5 порядка) проявлялось на частотах $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$ одновременно с максимумом интенсивности DMкомпоненты при $f_{\rm H} \approx f_{\rm HDM\,max}$, при возрастании (частоты нагрева $f_{\rm H} > f_{\rm HDM\,max}$) начиналось снижение мощностей $S_{\rm IL}$ для всех трёх максимумов. В области $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$ можно отметить относительное локальное возрастание $S_{\rm IL0}$. На частотах $f_{\rm H} \approx f_{\rm HBUM\,max}$ проходил спад максимумов S_{ILU}, S_{ILD} и S_{ILO}, который продолжался до конца цикла. В конце нагревного цикла на частотах накачки, превышающих $f_{\rm HR}$ на 145 \div 155 кГц, устанавливались мощности $S_{\rm IL}$, сопоставимые с фоновыми значениями.

Результаты анализа спектров некогерентного рассеяния в высокочастотном диапазоне показали возбуждение инициированных нагревом плазменных линий (HFPL) в широком диапазоне изменений частот накачки $f_{\rm H}$ около пятой гармоники гирочастоты электронов.

На рис. 5*a* представлена спектрограмма частот излучений инициированных нагревом плазменных линий $f_{\rm HFPL}(t)$, измеренная 25 октября 2013 года с 14:01 до 15:21 UT в диапазоне высот 128÷302 км. Вид зависимости $f_{\rm HFPL}(t)$ на рис. 5*a* является типичным для всех экспериментов с частотой нагрева вблизи пятой гармоники гирочастоты, выполненных в октябре 2013 года. Характерной особенностью в поведении инициированных нагревом плазменных линий для частот $f_{\rm H} \approx 5 f_{\rm ce}$ являлось наличие на спектрограммах двух треков линий HFPL: HFPL₁ и HFPL₂.

Плазменные линии HFPL₁ возбуждались на частотах, близких к значениям частот накачки $f_{\rm H}$, и наблюдались в диапазоне $f_{\rm HR} - 100$ кГц $\leq f_{\rm H} \leq f_{\rm HR} + 30$ кГц. Плазменные линии HFPL₂ регистрировались на частотах, превышающих частоты накачки $f_{\rm H}$ на 150÷250 кГц, в диапазоне изменения частоты нагрева $f_{\rm HR} - 100$ кГц $\leq f_{\rm H} \leq f_{\rm HR} + 10$ кГц. В моменты включений передатчика мощных коротких радиоволн регистрировались отклики как для линий HFPL₁, так и для линий HFPL₂. Для дискретного набора высот на рис. 56 и 6 приведены вариации во времени мощностей линий HFPL₁ и HFPL₂ ($S_{\rm PL1}$ и $S_{\rm PL2}$) соответственно. После возбуждения линий HFPL₁ и HFPL₁ и HFPL₂ наблюдался рост мощностей $S_{\rm PL1}$ и $S_{\rm PL2}$. При увеличении частоты $f_{\rm H}$ в нагревном цикле на 5 кГц каждые 20 с до значений $f_{\rm H} \approx f_{\rm HDM\,max}$ мощности $S_{\rm PL1}$ и $S_{\rm PL2} > S_{\rm PL1}$. На



Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.



Рис. 5. Результаты измерений линий HFPL 25 октября 2013 года в период 14:00÷15:25 UT, когда частота накачки изменялась вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов в диапазоне $f_{\rm H} = 6,700\div6,995$ МГц. Нагрев проводился циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза с 14.01 UT. На оси времени отмечены циклы нагрева и моменты двойных резонансов. На панели (*a*) представлена спектрограмма $f_{\rm HFPL}(t)$ в области высот 128÷302 км, панелях (δ) и (ϵ) — вариации мощностей плазменных линий $S_{\rm PL1}(t)$ трека HFPL₁ и $S_{\rm PL2}(t)$ трека HFPL₂ соответственно на заданных высотах (указаны на рисунках). Пространственно-временное распределение мощностей линий HFPL₁ и HFPL₂ в диапазоне высот 200÷240 км представлено на панелях (ϵ) и (d) соответственно

частотах накачки $f_{\rm H} > f_{\rm HDM\,max}$ значения $S_{\rm PL1}$ резко (на порядок) увеличивались, а мощности $S_{\rm PL2}$ начинали уменьшаться. Наибольшие значения мощности $S_{\rm PL2}$ наблюдались на частотах $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$ одновременно с повышенной интенсивностью DM-компоненты в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы. На частотах накачки выше двойного резонанса $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$ (n = 5) мощности $S_{\rm PL1}$ и $S_{\rm PL2}$ резко уменьшались и при $f_{\rm H} \approx f_{\rm HBUM\,max}$ линии HFPL₁ и HFPL₂ исчезали. На рис. 5г и ∂ показаны высотно-временны́е распределения $S_{\rm PL1}(t,h)$ и $S_{\rm PL2}(t,h)$ соответственно. Высоты возбуждений линий HFPL₁ и HFPL₂ соотносятся с высотами формирования линий HFIL с точностью до ошибки измерений радара ±3 км.

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.



Рис. 6. Высотно-временно́е распределение электронной концентрации $N_{\rm e}$ (*a*), температуры электронов $T_{\rm e}$ (*б*) в диапазоне высот от 140 до 450 км и первичных значений $N_{\rm raw}$ в диапазоне высот от 130 до 278 км (*b*) по данным радара некогерентного рассеяния в г. Тромсё на частоте 930 МГц в период эксперимента 29 октября 2013 года ($f_{\rm H} \approx 6 f_{\rm ce}$). Соответствующие спектрограммы искусственного радиоизлучения ионосферы представлены на панели (*z*). На оси времени показаны периоды нагрева и отмечены моменты регистрации двойных резонансов по данным искусственного радиоизлучения ионосферы

2.1.2. Результаты наблюдений радаром некогерентного рассеяния при воздействии на частотах вблизи шестой гармоники гирочастоты электронов

Ионосферные условия 22, 27, 28 и 29 октября 2013 года над нагревным комплексом EISCAT/Heating позволили провести эксперименты по модификации высокоппиротной ионосферы на частотах около шестой гармоники гирочастоты электронов $f_{\rm H} \approx 6 f_{\rm ce}$. Мощная волна обыкновенной поляризацией излучалась в диапазоне частот 7,950÷8,245 МГц или 8,0÷8,3 МГц в направлении магнитного зенита (см. табл. 1). Эксперименты проводились в основном с 14:00 до 15 UT, за исключением 22 октября, когда воздействие осуществлялось с 12:00 до 14:30 UT. Быстрое уменьшение критических частот $f_{\rm oF_2}$ ионосферного слоя F_2 в периоды наблюдений приводило к тому, что в первом интервале нагрева 14:01÷14:21 UT выполнялись условия $f_{\rm H} < f_{\rm oF_2}$. В цикле с 14:31 до 14:51 UT нагрев проводился на частотах $f_{\rm H}$, близких к критическим частотам, $f_{\rm H} \approx f_{\rm oF_2}$.

На рис. 6 в качестве характерного примера результатов радарных измерений в экспериментах по модификации ионосферы на частотах накачки $f_{\rm H} \approx 6 f_{\rm ce}$ показаны высотно-временны́е распределения электронной концентрации $N_{\rm e}$ (*a*) и температуры электронов $T_{\rm e}$ (*b*) в диапазоне высот от 150 до 450 км для интервала времени 14:00÷15:00 UT 29 октября 2013 года. Данные обрабатывались с шагом интегрирования по времени 20 с. Отметим, что 29.10 2013 в интервале с 14:01 до 14:21 UT мощная радиоволна отражалась от ионосферного слоя F_2 , $f_{\rm H} < f_{\rm oF_2}$. В середине следующего интервала 14:31÷14:51 UT критическая частота $f_{\rm oF_2}$ резко уменышилась и нагрев проводился вблизи критической частоты $f_{\rm H} \approx f_{\rm oF_2}$. На рис. 6*г* приведены спектрограммы

интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы в полосе частот отстроек от частоты нагрева $f_{\rm H}$ от $-50~{\rm k}\Gamma$ ц до 100 к Γ ц для двух циклов нагрева 29.10.2013 (обозначения аналогичны рис. 2*г*).

Как следует из рис. 6a, в интервале 14:01÷14:21 UT ($f_{\rm H} < f_{\rm oF_2}$) с 14:11 наблюдалось возрастание электронной концентрации $N_{\rm e}$ примерно на 40 % по сравнению с уровнем $N_{\rm e}$ в первые 10 мин нагревного цикла. Возрастание происходило в широком диапазоне высот от уровня отражения мощной радиоволны до 450 км. Значимое увеличение концентрации N_e в широком диапазоне высот зарегистрировано также с 14:37 UT при нагреве в цикле 14:31 \div 14:51 UT ($f_{\rm H} \approx$ $\approx f_{0F_2}$). В условиях нагрева $f_{\rm H} < f_{0F_2}$ и $f_{\rm H} \approx 6 f_{\rm ce}$ концентрация $N_{\rm e}$ начинала возрастать на частотах накачки ниже частоты двойного резонанса, $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$, когда $f_{\rm H} \approx f_{\rm HDM\,max} + 5 \div 10$ кГц, аналогично тому, как это имело место для экспериментов с нагревом на частоте около пятой гармоники гирочастоты. Одновременно с увеличением концентрации N_e наблюдался спад интенсивности DM-компоненты искусственного радиоизлучения ионосферы. На частотах $f_{\rm H}$ выше двойного резонанса, $f_{\rm H} \ge f_{\rm HR} + 45 \div 60$ кГц, уровень концентрации $N_{\rm e}$ на высотах слоя F_2 начинал плавно снижаться и в конце цикла приближался к значениям, наблюдаемым в первые минуты цикла нагрева. Отметим, что в области частот $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR} + 45 \div 60$ к $\Gamma_{\rm H} = f_{\rm HBUM\,max}$ наблюдалась максимальная интенсивность BUM-компоненты искусственного радиоизлучения ионосферы. Во втором цикле $(f_{\rm H} \approx f_{\rm oF_2})$ резкое возрастание концентрации $N_{\rm e}$ происходило в более узком диапазоне высот по сравнению с первым циклом, при этом повышенный уровень N_e на высотах слоя F_2 регистрировался до конца цикла.

На рис. 66 можно видеть возрастание температуры электронов $T_{\rm e}$ на высотах F_2 слоя ионосферы с началом нагревных циклов. В цикле 14:31÷14:51 UT, когда $f_{\rm H} \approx f_{\rm o}F_2$, увеличение $T_{\rm e}$ имело место в более широком диапазоне высот по сравнению с первым циклом. В целом, поведение температуры $T_{\rm e}$ при воздействии вблизи шестой гармоники гирочастоты аналогично изменениям $T_{\rm e}$ при воздействии около пятой гармоники.

На рис. 6*в* приведено высотно-временно́е распределение первичных значений концентрации электронов $N_{\rm raw}$ (мощности рассеянных сигналов) с 14:00 до 15:00 UT в диапазоне высот от 170 до 270 км и с разрешением 1,5 км. Из рис. 6*в* следует, что усиленные нагревом ионные линии HFIL регистрировались не только при включении нагревного комплекса, но и в течение интервалов нагрева. На протяжении интервала 14:01÷14:21 UT ($f_{\rm H} < f_{\rm oF_2}$) высота расположения линий HFIL $h_{\rm HFIL}$ увеличилась на 10 км от начального уровня, с небольшим локальным понижением на 3÷4 км на частотах накачки $f_{\rm H}$ около $f_{\rm HR}$. На частотах $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$ наблюдается уменьшение мощности линий HFIL и рост концентрации $N_{\rm e}$ (см. рис. 6*a*). Во втором цикле, пока выполнялось условие $f_{\rm H} \leq f_{\rm oF_2}$, отмечался рост высоты $h_{\rm HFIL}$ при увеличении частоты нагрева до $f_{\rm H} \leq f_{\rm HR} + 5\div10$ кГц, сопровождавшийся нарастанием мощности ионных линий $S_{\rm L}$. С 14:40 UT на частотах $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} \approx f_{\rm oF_2}$, пока в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы регистрировалась ВUM-компонента, наблюдалось понижение высоты $h_{\rm HFIL}$ на 10 км, так что она становилась меньше значения $h_{\rm HFIL}$ в начале цикла. В конце цикла при исчезновении компоненты BUM высота $h_{\rm HFIL}$ возросла до 250 км.

Результаты спектральной обработки данных радара некогерентного рассеяния в диапазоне ионно-акустических частот при воздействии на частоте около шестой гармоники гирочастоты электронов показаны на рис. 7 и 8. На на рис. 7 приведены спектры ионных линий на различных высотах для четырёх моментов времени. Спектры на рис. 7(a)-(6) относятся к интервалу $14:01\div14:21$ UT ($f_{\rm H} < f_{{\rm o}F_2}$), рис. 7(e) — к интервалу $14:31\div14:51$ UT, в котором $f_{\rm H} \approx f_{{\rm o}F_2}$. Выбранные моменты времени характеризуются следующими особенностями: максимальной интенсивностью DM-компоненты искусственного радиоизлучения ионосферы перед двойным резонансом, $f_{\rm H} \approx f_{\rm HDM\,max}$ (рис. 7e), двойным резонансом, $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$, (рис. 7e) и (рис. 7e), и максимумом



Рис. 7. Данные измерений линий HFIL радаром некогерентного рассеяния в г. Тромсё в экспериментах с нагревом на частоте вблизи шестой гармоники гирочастоты электронов 29 октября 2013 года. Приведены спектры линий HFIL на различных высотах в моменты времени, соответствующие времени регистрации максимальной интенсивность DM-компоненты перед двойным резонансом (для условий нагрева на частотах $f_{\rm H} < f_{{}_{\rm OF_2}}$, (*a*) и $f_{\rm H} \approx f_{{}_{\rm OF_2}}$, (*z*)), максимального подавления DMкомпоненты при $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} < f_{{}_{\rm OF_2}}$ (*b*) и максимальной интенсивности BUM-компоненты при $f_{\rm H} < f_{{}_{\rm OF_2}}$ (*b*). Спектры приведены для трёх фиксированных высот (выбранных из их последовательности, задаваемой интервалом 3 км) с наиболее высокими значениями мощностей $S_{\rm ILO}$, $S_{\rm ILU}$ и $S_{\rm ILD}$. Аналогично рис. 3 для каждой высоты разными линиями показаны три спектра, измеренные через 20 с в одноминутном интервале, высоты указаны на рисунках

интенсивности BUM-компоненты, $f_{\rm H} \approx f_{\rm HBUM\,max}$ (рис. 7*6*). Из приведённых спектров $S_{\rm IL}$ можно видеть, что для условий $f_{\rm H} < f_{\rm oF2}$ и $f_{\rm H} \ge f_{\rm HR}$ кроме смещённых максимумов ионных линий $S_{\rm ILU}$ и $S_{\rm ILD}$ регистрировался несмещённый относительно нуля максимум $S_{\rm IL0}$. Особенностью наблюдений линий HFIL при условии $f_{\rm H} \approx f_{\rm HBUM\,max}$ ($f_{\rm H} < f_{\rm oF2}$) является превышение мощности несмещённого максимума $S_{\rm IL0}$ над боковыми максимумами ионных линий, сопровождаемое нарастанием интенсивности DM-компоненты для условий выше двойного резонанса, $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$.

На рис. 8 показаны вариации во времени мощностей максимумов $S_{\rm IL0}$, $S_{\rm ILU}$ и $S_{\rm ILD}$ для шести ионосферных высот. Усиление мощностей ионных линий $S_{\rm ILU}$ и $S_{\rm ILD}$ на один порядок (по сравнению с фоновыми значениями) наблюдалось на частотах $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} \approx f_{\rm HDM\,max}$. В условиях нагрева на частотах ниже критической частоты ($f_{\rm H} < f_{\rm oF_2}$) оно регистрировалось на высотах $219 \div 222$ км, а при нагреве вблизи критической частоты ($f_{\rm H} \approx f_{\rm oF_2}$) — на высотах $234 \div 237$ км. В моменты двойных резонансов $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$ (см. рис. 76, ϵ) мощности $S_{\rm ILU}$ и $S_{\rm ILD}$ начинают снижаться. На частотах $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$ при условии $f_{\rm H} < f_{\rm oF_2}$ мощности $S_{\rm ILU}$ и $S_{\rm ILD}$ продолжают уменьшаться в цикле нагрева до фоновых уровней. Однако мощности $S_{\rm IL0}$ (при $f_{\rm H} < f_{\rm oF_2}$ и $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$) увеличиваются в областях высот отражений. Отметим, что при нагреве вблизи критической частоты



Рис. 8. Временны́е вариации мощностей S_{ILD} (*a*), S_{ILO} (*b*) и S_{ILU} (*b*) для различных высот (указаны на рисунке в километрах). Интервал нагрева 14:01÷14:50 UT 29.10.2013

регистрируемые мощности максимумов S_{ILU} и S_{ILD} в 2÷5 раз выше, чем в условиях $f_{\text{H}} < f_{\text{o}F_2}$.

Анализ спектров с радара некогерентного рассеяния в высокочастотном диапазоне при нагреве на частоте вблизи шестой гармоники гирочастоты электронов, аналогично случаю воздействия на частоте вблизи пятой гармоники, $f_{\rm H} \approx 5 f_{\rm ce}$, показал наличие инициированных нагревом плазменных линий (HFPL) в широком диапазоне изменений частот нагрева $260\div295$ кГц. На рис. 9 показаны результаты спектральной обработки данных за 29 октября 2013 года с 14:00 до 14:55 UT, которые являются типичными для экспериментов в октябре 2013 года при воздействии на частоте вблизи шестой гармоники. Рисунок 9*a* демонстрирует спектрограмму излучений инициированных нагревом плазменных линий $f_{\rm HFPL}(t)$, измеренную в диапазоне высот $209\div383$ км. При регистрации линий HFPL частоты возбуждений инициированных нагревом плазменных линий $f_{\rm HFPL}$ были близки к частотам накачки стенда EISCAT/Heating. На рис. 9*б* приведены вариации во времени мощности линий HFPL, $S_{\rm PL}(t)$, для дискретного набора высот. Высотно-временно́е распределение $S_{\rm PL}(t, h)$ показано на рис. 9*c*. Мощности $S_{\rm PL}$ при модификации ионосферы с частотой $f_{\rm H} \approx f_{\rm oF2}$

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.



14:00 14:10 14:20 14:30 14:40 14:50 время (UT), ч:мин Рис. 9. Данные измерений линий HFPL 29 октября 2013 года в период 14:00÷14:55 UT в экспериментах с нагревом на частоте вблизи шестой гармоники гирочастоты, $f_{\rm H} = 7,795$ ÷8,245 МГц. Периоды нагрева и моменты двойных резонансов отмечены на осях времени. Спектрограмма $f_{\rm HFPL}(t)$ в области высот 209÷383 км приведена на панели (*a*). Вариации мощности плазменных линий $S_{\rm PL}(t)$ линий HFPL на фиксированных высотах показаны на панели (*b*). Пространственно-временно́е рас-

пределение линий HFPL в диапазоне высот 200÷260 км приведено на панели (в)

(интервал 14:31÷14:51 UT) были в 2÷6 раз выше, чем при нагреве ионосферы на частотах ниже f_{oF_2} (интервал 14:01÷14:21 UT). Максимальные мощности плазменных линий $S_{\rm PL}$ наблюдались в области частот нагрева $f_{\rm H} \approx f_{\rm HDM\,max}$. Уменьшение мощности $S_{\rm PL}$ начиналось при частотах волны накачки выше частоты двойного резонанса и частоты, отвечающей максимальной ин-

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.

640

тенсивности ВUM-компоненты, $f_{\rm H} \geq f_{\rm HBUM\,max}$. Спад $S_{\rm PL}$ проходил существенно быстрее при условии нагрева на частотах $f_{\rm H} < f_{\rm oF_2}$, по сравнению с нагревом вблизи частоты $f_{\rm oF_2}$. Высоты возбуждения линий HFPL близки к высотам расположения линий HFIL и изменялись в циклах нагрева аналогичным образом.

2.2. Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности

Одним из признаков возбуждения двойных резонансов в нагревных экспериментах является подавление интенсивностей мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей. В данном разделе приведены результаты наблюдений таких неоднородностей в нагревных экспериментах в октябре 2013 года при воздействии на частоте вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов. Измерения выполнены с использованием когерентного коротковолнового радара CUTLASS (г. Ханкасалми, Финляндия) и методом ракурсного рассеяния на сети диагностических радиотрасс с помощью многоканального коротковолнового доплеровского комплекса на НИС «Горьковская» под г. Санкт-Петербург (см. карту на рис. 1 [13]).

На рис. 10 представлены результаты наблюдений коротковолновым радаром CUTLASS 25 и 29 октября 2013 года. Эксперименты проводились 25 октября с 14:00 до 15:30 UT при модификации ионосферы на частотах накачки $f_{\rm H} \approx 5 f_{\rm ce}$ (рис. 10*a*, *e*, *d*, *ж*) и 29 октября — с 14:00 до 15:00 UT при частотах накачки $f_{\rm H} \approx 6 f_{\rm ce}$ (рис. 10*b*, *e*, *e*, *s*). В период указанных экспериментов радар CUTLASS работал на трёх частотах около 16, 18 и 20 МГц, что обеспечивало получение информации о поведении искусственных неоднородностей с поперечными к магнитному полю размерами l_{\perp} порядка 9, 8 и 7,5 м. Регистрация рассеянных на неоднородностях сигналов проводилась в нестандартном режиме на один фиксированный луч (луч 5), ориентированный в направлении г. Тромсё, с высоким временны́м (3 с) и пространственным (15 км) разрешением. Первые «ворота» по дальности соответствовали 480 км. Дальность до центра искусственно возмущённой области ионосферы над г. Тромсё соответствует «воротам» 31. На рис. 10*a* и *б* приведены зависимости от времени мощностей рассеянных сигналов в искусственно возмущённой области ионосферы на трёх частотах для 25 и 29 октября соответственно. На остальных панелях рис. 10 приведены вариации мощностей рассеянных сигналов в координатах дальность $R_{\rm g}$ — мировое время на различных частотах.

Из рис. 10 видно, что в период экспериментов регистрировались интенсивные обратно-рассеянные на неоднородностях сигналы. Время возникновений двойных резонансов при сканировании частоты накачки, полученное по данным измерений спектров искусственного радиоизлучения ионосферы (табл. 1), указано на оси времени рис. 10а и б. Анализ мощностей рассеянных на неоднородностях сигналов Р_{МИИН} по данным измерений радаром CUTLASS показал, что для воздействия на частоте около пятой гармоники гирочастоты электронов подавление Р_{МИИН} на частотах накачки $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$ составило $-(5 \div 2)$ дБ. При этом для воздействия на шестой гармонике подавление мощности Р_{МИИН} практически отсутствовало. При нагреве на пятой гармонике гирочастоты электронов на частотах $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$ наблюдалось увеличение $P_{\rm MUH}$ на 5÷10 дБ. В целом для экспериментов с нагревом на частоте вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов наиболее интенсивное подавление мощности Р_{МИИН} в двойном резонансе и наибольшие возрастание мощности рассеянных на неоднородностях сигналов на частотах выше двойного резонанса отмечалось для более крупномасштабных неоднородностей ($l_{\perp} \approx 9$ м). Неоднородности с поперечными масштабами $l_{\perp} \approx 7,5$ м подавлялись в меньшей степени. Аналогичное поведение неоднородностей отмечалось и при воздействии на третьей гармонике гирочастоты электронов [26], когда неоднородности с масштабами $l_{\perp} < 10$ м подавлялись более слабо по сравнению с неоднородностями более крупных масштабов с $l_{\perp} \approx 12 \div 15$ м.

На рис.11 в качестве примера представлены результаты измерений методом ракурсного рассе-

Рис. 10. Данные наблюдений когерентным коротковолновым доплеровским радаром CUTLASS (Ханкасалми, Финляндия, луч 5, ориентированный на искусственно возмущённую область ионосферы над г. Тромсё) на частотах 16,3; 18,0 и 19,9 МГц в экспериментах 25 и 29 октября 2013 года. Динамика мощностей рассеянных сигналов в искусственно возмущённой области ионосферы над г. Тромсё 25.10.2013 (*a*) и 29.10.2013 (*б*). Вариации мощностей рассеянных сигналов в координатах дальность (номер ворот Rg) — мировое время для различных частот радара CUTLASS 25.10.2013 (*e*, *e*, *s*). Периоды нагрева и времена двойных резонансов отмечены на оси времени

яния 25 октября 2013 года с 14:00 до 15:00 UT на трассе Новосибирск—Тромсё—Санкт-Петербург. Измерения проведены на НИС «Горьковская» на диагностической частоте $f_{диагн} = 15\,670$ кГц. На рис. 11 показаны динамические доплеровские спектры радиосигнала и временные вариации относительной спектральной мощности рассеянных сигналов. Распространению «прямого» сигнала из г. Новосибирск в г. Санкт-Петербург соответствует нулевая доплеровская частота. Расстояние между г. Новосибирск и г. Тромсё составляет 3 500 км, угол падения диагностического сигнала на

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.

Рис. 11. Динамические доплеровские спектры радиосигнала с частотой $f_{диагн} = 15\,670$ кГц на трассе Новосибирск—Тромсё—Санкт-Петербург, измеренные методом ракурсного рассеяния 25 октября 2013 года с 14:00 до 15:00 UT (*a*) и временные вариации относительной спектральной мощности рассеянных сигналов (*б*). Периоды излучения нагревного стенда EISCAT/Heating отмечены на оси времени

возмущённую область $70^{\circ} \div 80^{\circ}$. Это означает, что рассеяние в основном проходило на неоднородностях с поперечными масштабами $l_{\perp} \approx 10$ м. Отметим, что 25.10.2013 в 10-ую и 40-ую минуты каждого часа т. е. в моменты, близкие к моментам двойных резонансов) включались сторонние регулярные помехи (см. рис. 11*a*), которые не позволяли определить малую величину ослабления мощности диагностических сигналов, рассеянных на искусственных неоднородностях.

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.

В динамических доплеровских спектрах радиосигнала (см. рис. 11a) ясно наблюдается не только усиление мощности рассеянного коротковолнового радиосигнала, но и уширение доплеровского спектра рассеянного сигнала при нагреве на частотах выше пятой гармоники гирочастоты электронов. Подобное явление отмечалось ранее в экспериментах на частотах вблизи четвёртой гармоники гирочастоты электронов [5, 27].

Из данных, представленных на рис. 10 и 11, можно видеть, что при воздействии на частоте вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов искусственные неоднородности с поперечными масштабами $l_{\perp} \approx 7,5 \div 9,0$ м подавляются в двойном резонансе слабо ($-(5 \div 2)$ дБ). При воздействии на шестой гармонике гирочастоты электронов неоднородности с теми же пространственными масштабами практически не подавляются.

3. ОБОБЩЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования, выполненные в октябре 2013 года, позволили провести анализ эффектов модификации высокоширотной F-области ионосферы при её нагреве мощными короткими радиоволнами с О-поляризацией и с частотами вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов по данным различных средств и методов диагностики ионосферной плазмы. Основное внимание уделено результатам исследований с помощью радара некогерентного рассеяния в г. Тромсё, совмещённого с коротковолновым нагревным комплексом EISCAT/Heating. Данные радара обеспечили возможность исследований поведения электронной концентрации N_e, температуры электронов T_e и спектров плазменных и ионных линий. В период экспериментов осуществлялась также регистрация радиосигналов, рассеянных на искусственных ионосферных неоднородностях с различными пространственными масштабами, и спектров искусственного радиоизлучения ионосферы в килогерцовом диапазоне частот. Для проведения анализа экспериментальных данных (см. раздел 2) выполнены расчёты высот отражения мощной короткой радиоволны с обыкновенной поляризацией, $h_{\text{отрО}}$, в направлении магнитного зенита и высот верхнего гибридного резонанса, *h*_{UH}. Особенностью исследований эффектов при воздействии на частоте вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов при излучении мощной радиоволны в направлении магнитного поля Земли является то, что высота отражения волны h_{отр} близка к высотам верхнего гибридного резонанса $h_{\rm UH}$ для n = 5, а для n = 6 высота отражения $h_{\rm orpO}$ меньше $h_{\rm UH}$. Тем не менее, как показано в работе [1], за счёт омического нагрева электронов в области отражения плазма «продавливается» вверх и волна достигает области верхнего гибридного резонанса.

Появление в спектрах радара некогерентного рассеяния инициированных нагревом плазменных и усиленных ионных линий является прямым доказательством развития параметрических распадных (стрикционных) неустойчивостей на высотах вблизи отражения мощной радиоволны от ионосферы [21–24]. При возбуждении параметрической распадной неустойчивости (parametric decay instability, PDI) происходит трёхволновой параметрический распад высокочастотной электромагнитной волны накачки на более слабую высокочастотную волну Ленгмюра (электростатические плазменные колебания) и низкочастотную ионно-акустическую волну [1, 22, 28]. Рядом авторов [29, 30] также изучалась осциллирующая двухпотоковая неустойчивость (oscillating two stream instability, OTSI). Данная неустойчивость развивается вследствие взаимодействия четырёх волн, при котором происходит распад высокочастотной электромагнитной волны накачки на две противоположно распространяющиеся высокочастотные ленгмюровские волны и ионноакустическую стоячую волну. Время существования этих неустойчивостей составляет миллисекунды с момента включения мощного нагревного передатчика. Далее, по мере развития тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости (thermal parametric instability, TPI), ответственной за генерацию искусственных неоднородностей, происходит подавление неустойчивостей PDI

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.

644

и OTSI [1, 28].

В нагревных экспериментах при воздействии на частотах вблизи гармоник гирочастоты электронов одновременно могут возбуждаться как тепловая параметрическая (резонансная) неустойчивость TPI, так и параметрическая распадная (стрикционная) неустойчивость, как было показано ранее в работе [13] на примере экспериментов вблизи четвёртой гармоники. Общей особенностью нагревных экспериментов на пятой и шестой гармониках гирочастоты электронов явилось одновременное существование неустойчивостей PDI, OTSI и TPI.

Суммируя результаты наблюдений при воздействии на частоте вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов, можно выделить следующие особенности.

В спектрах мощности ионно-акустических линий $S_{\rm HFIL}$ в диапазоне частот нагрева 295 кГц одновременно наблюдаются три усиленных максимума $S_{\rm ILU}$, $S_{\rm ILD}$ и $S_{\rm IL0}$, что свидетельствует о возбуждении неустойчивостей PDI и OTSI на высотах, близких к высоте отражения мощной короткой радиоволны. Мощности $S_{\rm ILU}$, $S_{\rm ILD}$ и $S_{\rm IL0}$ для частот ниже частот двойного резонанса, $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$, были на порядок выше, чем для частот $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$.

Инициированные нагревом плазменные линии HFPL на сонограммах $S_{\rm PL}(f,t)$ проявлялись в виде двух треков HFPL₁ и HFPL₂, разнесённых по частоте. Плазменные линии HFPL₁ возбуждались на частотах $f_{\rm PL1}$, близких по значениям к частотам волны накачки $f_{\rm H}$. Второй вид плазменных линий HFPL₂ возбуждался на более высоких частотах $f_{\rm PL2} \approx f_{\rm H} + 150 \div 250$ кГц. Плазменные линии регистрировались около двойного резонанса при изменении частот накачки от $f_{\rm HR} - 100$ кГц до $f_{\rm HR} + 30$ кГц. Верхняя граница этого частотного диапазона соответствует частоте нагрева $f_{\rm H max BUM}$, на которой регистрировался максимум интенсивности BUM-компоненты в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы. Мощности плазменных линий $S_{\rm PL}$ резко уменьшались на частотах нагрева выше двойного резонанса, $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$. Отметим, что при увеличении частоты волны накачки, пока выполнялось условие $f_{\rm H} < f_{\rm HDM \,max}$, мощности $S_{\rm PL1}$ и $S_{\rm PL2}$ были сравнимы, а иногда даже имело место соотношение $S_{\rm PL1} < S_{\rm PL2}$. При дальнейшем увеличении частоты $f_{\rm H}$ в нагревном цикле, когда $f_{\rm H} > f_{\rm HDM \,max}$, мощности $S_{\rm PL1}$ резко возрастали и становились в 10÷30 раз большее, чем $S_{\rm PL2}$.

Сравнение пространственно-временны́х распределений $S_{\rm PL}(t,h)$ и $S_{\rm IL}(t,h)$ показало, что в пределах погрешности радарных измерений (±3 км) высоты возбуждения линий HFPL₁ ($h_{\rm PL1}$) и HFPL₂ ($h_{\rm PL2}$) в целом соответствуют как высотам формирования ионно-акустических линий HFIL ($h_{\rm IL}$), так и рассчитанным значениями $h_{\rm orpO}$ и $h_{\rm UH}$. Тем не менее, целесообразно провести дальнейшие исследования для получения более точной картины высотных распределений для линий HFPL и HFIL. Особенностью плазменных линий HFPL₂ являлись близкие значения их высот возбуждения $h_{\rm PL2}$ в течение локального цикла нагрева. Плазменные линии HFPL₂ существовали в условиях, когда наблюдались более высокие значения максимумов мощностей ионно-акустических линий $S_{\rm HFIL}$ ($S_{\rm ILU}$ и $S_{\rm ILD} > 4\,000$ отн. ед., $S_{\rm IL0} > 1\,000$ отн. ед.) по сравнению со значениями $S_{\rm HFIL}$, при которых регистрировались только линии HFPL₁.

Можно полагать, что плазменные линии HFPL₁ возбуждались в процессе параметрического распада мощной электромагнитной волны в области отражения на высокочастотную плазменную ленгмюровскую волну с частотой $f_{\rm PL1}$ и низкочастотную ионно-акустическую волну с частотой $f_{\rm IA}$ ($f_{\rm H} = f_{\rm IA} + f_{\rm PL1}$) [1, 22, 28]. Экспериментальные данные по спектрам ионных линий свидетельствуют, что на высотах отражения и верхней гибридной высоте (в нашем случае они близки), кроме неустойчивости PDI, возникает также двухпотоковая осциллирующая неустойчивость (OTSI).

Природа возбуждения линий HFPL₂ остаётся невыясненной. В качестве одного из возможных объяснений генерации плазменных волн на частотах $f_{\rm PL2}$, превышающих частоту накачки $f_{\rm H}$ в экспериментах при $f_{\rm H} \approx 5 f_{\rm ce}$, может быть рассмотрена возможность взаимодействия в области

развития параметрической распадной неустойчивости на высотах $h_{\text{отрO}} \approx h_{\text{UH}}$ четырёх плазменных волн. Предположим, что в области отражения возбуждаются продольные плазменные волны на частотах ионосферы f_{plasm} , в наших экспериментах $f_{\text{plasm}} \approx f_{\text{H}} \cos(12^{\circ})$. На высотах отражения происходит трансформация мощной радиоволны в поперечные верхние гибридные волны на частотах f_{UH} (1) и существуют поперечные волны Бернштейна с частотами f_{B} . Предположим, что в результате взаимодействия трёх волн возникает четвёртая продольная плазменная волна с частотой f_{PL2} . При этом пусть для четырёх частот высокочастотных волн f_{B} , f_{UH} , f_{plasm} и f_{PL2} выполняется соотношение

$$f_{\rm B} + f_{\rm UH} = f_{\rm plasm} + f_{\rm PL2}.$$
 (2)

Для частот волны накачки $f_{\rm H} \approx 5 f_{\rm ce}$ на высотах двойного резонанса можно считать $f_{\rm ce} \approx f_{\rm B}/5$. Тогда, с учётом формул (1) и (2), частоту $f_{\rm PL2}$ можно оценить из приближённого выражения

$$f_{\rm PL2} \approx f_{\rm B} + f_{\rm B}^2 / f_{\rm plasm} / 50. \tag{3}$$

При этом условие волнового синхронизма имеет вид

$$\mathbf{k}_{\rm B} + \mathbf{k}_{\rm UH} = \mathbf{k}_{\rm plasm} + \mathbf{k}_{\rm PL2},\tag{4}$$

где $\mathbf{k}_{\text{plasm}}$, \mathbf{k}_{PL2} — волновые векторы продольных ионосферных плазменных волн, а \mathbf{k}_{B} и \mathbf{k}_{UH} — волновые векторы поперечных магнитному полю бернштейновских и верхнегибридных волн.

Оценим количественно частоту $f_{\rm PL2}$ с использованием соотношений (2) и (3) для эксперимента 25 октября 2013 года. В первом цикле нагрева для момента времени 14:03 UT по экспериментальным данным $h_{\rm IL} = 214$ км, $f_{\rm H} = 6,73$ МГц, $f_{\rm B} = 5f_{\rm ce} = 6,81$ МГц на высоте $h_{\rm IL}$ по модели [17], $f_{\rm plasm} \approx 6,58 \pm 0,05$ МГц и $f_{\rm UH} = 6,72$ МГц. Значение частоты $f_{\rm PL2}$, рассчитанное по соотношению (2), составляет примерно 6,95 МГц, в выражении (3) величина добавки к частоте $f_{\rm B}$ равняется 0,14 МГц. По данным измерений $f_{\rm PL23kcn} \approx 6,95 \pm 0,05$ МГц (значения частот $f_{\rm PL1}$ и $f_{\rm PL2}$ регистрировались с точностью $\pm 0,05$ МГц). Во втором цикле нагрева моменту времени 14:36 UT соответствовали следующие параметры: $h_{\rm IL} = 214$ км, $f_{\rm H} = 6,765$ МГц, $f_{\rm B} = 5f_{\rm ce} = 6,81$ МГц, $f_{\rm plasm} \approx 6,62 \pm 0,05$ МГц и $f_{\rm UH} = 6,76$ МГц. Рассчитанные и измеренные значения частоты $f_{\rm PL2}$ были такими же, как и для момента 14:03 UT. Проведённые оценки частоты возбуждения плазменных линий HFPL₂ с использованием выражений (2) и (3) находятся в приемлемом соответствии с экспериментально наблюдаемыми значениями $f_{\rm PL2}$.

Подчеркнём, что вопрос о возбуждении HFPL₂ остаётся открытым и требует дальнейшего серьёзного исследования.

Отличительной чертой экспериментов с нагревом на частоте вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов явилось резкое (примерно на 50%) возрастание электронной концентрации $N_{\rm e}$ в широком диапазоне высот выше высоты отражения мощной короткой радиоволны вплоть до высоты порядка 550 км. Оно начиналось при спаде интенсивности DM-компоненты перед двойным резонансом и наблюдалось до конца нагрева.

При нагреве на частотах вблизи двойного резонанса, $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$, мощность рассеянных на неоднородностях (с $l_{\perp} = 7,5\div9$ м) сигналов $P_{\rm MИИH}$ уменьшалась на $2\div5$ дБ. Для частот $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} > f_{\rm HBUM\,max}$ мощность рассеянных сигналов $P_{\rm MИИH}$ становилась выше, чем при $f_{\rm H} < 5 f_{\rm ce}$.

В экспериментах с частотой накачки вблизи шестой гармоники гирочастоты электронов наблюдались следующие особенности.

Мощности максимумов ионных линий в спектре некогерентного рассеяния $S_{\rm ILU}$, $S_{\rm ILD}$ и $S_{\rm ILO}$ были почти на порядок ниже значений, регистрируемых при воздействии на частоте около пятой гармоники гирочастоты электронов. При нагреве на частотах вблизи критической частоты слоя

Соотношение	Наолюдаемые явления и их характеристики	Частоты накачки $f_{\rm H}$
между <i>J</i> _H и <i>J</i> _{HR}		относительно $f_{\rm HR}$,
		$f_{\rm HDMmax}, f_{\rm HBUMmax}$
$f_{\rm H} < f_{ m HR} \approx 5 f_{ m ce}$	Максимум интенсивности I _{DM}	$f_{\rm HDMmax}$
	Наблюдение усиленных нагревом ионно-акустических	Цикл нагрева
	линий HFIL (максимумы $S_{ILU}, S_{ILO}, S_{ILD}$)	
	Появление инициированных нагревом плазменных линии	
	HFPL_1 и HFPL_2	$f_{\rm HR} - 85 \div 100$ кГц
		$f_{ m HR}-75{\div}100$ кГц
	Уменьшение $T_{\rm e}$ на $30 \div 40 \%$	$f_{ m HDMmax} + 15 \div 25$ кГц
	Возрастание $N_{\rm e}$ на высотах слоя F_2 и выше на $25 \div 50 \%$	$f_{\rm HDMmax} + 10 \div 15 \ \kappa \Gamma$ ц
$f_{\rm H} \approx f_{\rm HR} \approx 5 f_{\rm ce}$	Подавление I _{DM}	$f_{\rm HR} \pm 5 \div 15$ кГц
	Ослабление $P_{\text{МИИН}}$ на 2÷5 дБ	$f_{ m HR}+10\div20$ кГц
	Подавление мощности линий HFPL ₁	$f_{\rm HR} + 25 \div 40 \ \kappa \Gamma$ ц
	Подавление мощности линий HFPL ₂	$f_{\rm HR} + 15 \div 25 \ \kappa \Gamma$ ц
$f_{\rm H} > f_{\rm HR} \approx 5 f_{\rm ce}$	Усиление I _{DM}	$f_{\rm HR} + 20 \div 30 \ \kappa \Gamma$ ц
	Регистрация BUM-компоненты	$f_{\rm HR} + 5 \div 135$ кГц
	Максимум интенсивности ВUM-компоненты	$f_{ m HBUMmax}$
	Локальное возрастание $T_{\rm e}$ на фоне уменьшения $T_{\rm e}$	$f_{\rm HR} + 20 \div 50 \ \kappa \Gamma$ ц
$f_{\rm H} < f_{\rm HR} \approx 6 f_{\rm ce}$	Максимум интенсивности I _{DM}	$f_{ m HDMmax}$
	Наблюдение усиленных нагревом ионно-акустических	Цикл нагрева
	линии HFIL (максимумы $S_{\rm ILD}, S_{\rm ILU}$)	
	Наблюдение усиленных нагревом ионно-акустических	от f _{HR} до конца цикла
	линии HFIL (максимумы S_{IL0})	
	Наблюдение инициированных нагревом плазменных	Цикл нагрева
	линии HFPL	
	Уменьшение $T_{\rm e}$ на $30 \div 40 \%$	$f_{\rm HDMmax} + 5 \div 20$ кГц
	Возрастание $N_{\rm e}$ на высотах слоя F_2 и выше на $10 \div 20 \%$	$f_{\rm HDMmax} + 5 \div 10, f_{\rm H} < f_{{\rm o}F_2}$ кГц
		$f_{ m HDMmax},f_{ m H}pprox f_{{ m o}F_2}$ кГц
$f_{\rm H} \approx f_{\rm HR} \approx 6 f_{\rm ce}$	Подавление $I_{\rm DM}$	$f_{ m HR} \pm 5 \div 15$ кГц
	Подавление мощности линий HFPL	$f_{\rm HR} + 25 \div 40 \ \kappa \Gamma$ ц
$f_{\rm H} > f_{\rm HR} \approx 6 f_{\rm ce}$	Усиление І _{DM}	$f_{\rm HR} + 20 \div 30 \ \kappa \Gamma$ ц
	Регистрация BUM-компоненты	$f_{\rm HR} + 5 \div 135$ кГц
	Максимум интенсивности ВUM-компоненты	$f_{ m HBUMmax}$ к Γ ц
	Локальное возрастание $T_{\rm e}$ на фоне уменьшения $T_{\rm e}$	$f_{\rm HR} - 10 \div 15 \ \kappa \Gamma$ ц, $f_{\rm H} < f_{{ m o}F_2}$
		$f_{\mathrm{HR}}, f_{\mathrm{H}} \approx f_{\mathrm{o}F_2}$

Таблица 2. Явления в высокоширотной *F*-области ионосферы, возникающие при нагреве на частотах вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов

 $F_2, f_{\rm H} \approx f_{{\rm o}F_2}$, мощности максимумов $S_{\rm ILU}$ и $S_{\rm ILD}$ были в 2÷5 раз выше, чем при модификации ионосферы на частотах $f_{\rm H} < f_{{\rm o}F_2}$.

Инициированные нагревом плазменные линии HFPL возбуждались в течение всего периода излучения волны накачки в виде одного трека с плазменными частотами, близкими к значениям частоты $f_{\rm H}$. Высоты регистрации линий HFPL сопоставимы с высотами возбуждения линий HFIL. Максимумы мощностей плазменных линий наблюдались (кроме включений) на частотах $f_{\rm H} \approx f_{\rm HDM\,max}$ и $f_{\rm H} \approx f_{\rm HBUM\,max}$.

В условиях модификации и
оносферы на частотах $f_{\rm H} < f_{\rm oF_2}$ наблюдалось возрастание электронной концентрации
 $N_{\rm e}$ примерно на 40% в широком диапазоне высот от высоты отражения мощной радиоволны до высот порядка 450 км. Аналогично поведению концентрации
 $N_{\rm e}$ при воздействии на частоте вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов, возрастание начиналось при спаде интенсивности DM-компоненты перед двойным резонансом. На частотах
 $f_{\rm H} > f_{\rm HR} + 45\div60$ кГц (максимальная интенсивность BUM-компоненты) уровень $N_{\rm e}$ плавно снижался и к концу цикла приближался к значениям, измеренным в первые минуты цикла. Для частот на-

качки $f_{\rm H} \ge f_{\rm o}F_2$ концентрация $N_{\rm e}$ увеличивалась в более узком диапазоне высот по сравнению с условиями нагрева при $f_{\rm H} < f_{\rm o}F_2$ и повышенный уровень $N_{\rm e}$ на высотах слоя F_2 регистрировался до конца цикла нагрева.

В экспериментах на частотах $f_{\rm H} \approx 6 f_{\rm ce}$ наблюдалось очень слабое подавление искусственных неоднородностей с пространственными поперечными масштабами $l_{\perp} = 7,5 \div 9,0$ м. Мощность рассеянных на неоднородностях сигналов $P_{\rm MUH}$ практически не изменялась в течение всего цикла нагрева.

В табл. 2 сведены основные обобщённые данные, характеризующие поведение параметров ионосферной плазмы ($N_{\rm e}$, $T_{\rm e}$), усиленных нагревом ионных и плазменных линий HFIL и HFPL, спектральных компонент DM и BUM искусственного радиоизлучения ионосферы и искусственных неоднородностей при нагреве на частотах около пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов. Данные приведены для различных соотношений между частотами нагрева $f_{\rm H}$ и частотами двойных резонансов $f_{\rm HR}$: $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$, $f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$. Качественная иллюстрация данных, представленных в табл. 2, в виде схемы приведена на рис. 12.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам комплексных исследований явлений в высокоширотной F-области ионосферы, возникающих при её нагреве мощными короткими радиоволнами с обыкновенной поляризацией в направлении магнитного зенита на частотах вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов ($f_{\rm H} = n f_{\rm ce}, n = 5, 6$) представляется возможным отметить следующее.

Детально исследованы особенности поведения спектров некогерентного рассеяния радиоволн (полученных на радаре с рабочей частотой 930 МГц) в низкочастотном (ионно-акустические волны) диапазоне. В спектрах мощности ионно-акустических линий в широком диапазоне сканирования частот нагрева (295 кГц) одновременно наблюдались три максимума, что свидетельствует о возбуждении неустойчивостей PDI и OTSI на высотах, близких к высоте отражения мощной радиоволны. Мощности в точках максимума на частотах ниже частот двойных резонансов, $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$, были на порядок выше, чем на частотах $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$. В экспериментах с воздействием на частоте вблизи шестой гармоники гирочастоты электронов мощности максимумов ионных линий были почти на порядок ниже соответствующих мощностей, регистрируемых при воздействии на частоте вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов.

Обнаружено существенное различие в поведении инициированных нагревом плазменных линий HFPL при воздействии вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов. При воздействии вблизи пятой гармоники плазменные линии HFPL на сонограммах $S_{\rm PL}(f,t)$ наблюдались в виде двух треков $HFPL_1$ и $HFPL_2$, разнесённых по частоте. Плазменные линии $HFPL_1$ возбуждались в процессе параметрической распадной неустойчивости на частотах $f_{\rm PL1}$, близких к частотам волны накачки f_H. Плазменные линии HFPL₂ возбуждались на более высоких частотах $f_{\rm PL2} \approx f_{\rm H} + 150 \div 250$ кГц. Предложен возможный механизм возбуждения линий HFPL₂ в результате четырёхволнового процесса взаимодействия. Плазменная волна с частотой fpl2 формируется в области возбуждения параметрической распадной неустойчивости на высоте отражения мощной радиоволны, близкой к высоте верхнего гибридного резонанса, при взаимодействии волн Бернштейна, ионосферных плазменных и верхнегибридных волн, возбуждаемых вследствие трансформации волны накачки. Выполненные оценки частоты возбуждения линий HFPL₂ находятся в приемлемом соответствии с экспериментально наблюдаемыми значениями. При воздействии на частоте вблизи шестой гармоники гирочастоты электронов инициированные нагревом плазменные линии HFPL возбуждались в течение всего цикла нагрева в виде только одного трека с плазменными частотами, близкими к значениям частоты волны накачки.

Рис. 12. Качественная картина поведения различных спектральных компонент искусственного радиоизлучения ионосферы (DM и BUM), $P_{\rm MИИH}$, параметров ионосферной плазмы ($T_{\rm e}$, $N_{\rm e}$) и линий HFIL и HFPL при нагреве ионосферы на частотах вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов по мере увеличения частоты нагрева $f_{\rm H}$

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.

Обнаружено увеличение электронной концентрации $N_{\rm e}$ на $40\div50\,\%$ в широком диапазоне высот (до $450\div500$ км). Увеличение начиналось при спаде интенсивности DM-компоненты перед двойным резонансом и продолжалось в течение всего времени существования BUM-компоненты в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы.

Показано, что при воздействии на частоте вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов происходит слабое подавление искусственных ионосферных неоднородностей с поперечными масштабами $l_{\perp} = 7,5 \div 9,0$ м. Мощность рассеянных сигналов $P_{\rm MUHH}$ уменьшалась на $2 \div 5$ дБ. Для частот нагрева $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} > f_{\rm HBUM\,max}$ мощности $P_{\rm MUHH}$ были выше, чем при частотах нагрева до двойного резонанса. Для нагрева с частотами вблизи шестой гармоники гирочастоты электронов мощность рассеянных на неоднородностях сигналов $P_{\rm MUHH}$ практически не изменялись в течение цикла нагрева.

Полученные результаты свидетельствуют об одновременном существовании при воздействии на частоте вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов тепловой параметрической неустойчивости (TPI), параметрической распадной неустойчивости (PDI) и осциллирующей двухпотоковой неустойчивости (OTSI) в широком диапазоне изменения частот нагрева (до 295 кГц).

Авторы выражают благодарность сотрудникам Европейской научной ассоциации EISCAT за помощь в проведении экспериментов в г. Тромсё (Норвегия). Система радаров CUTLASS в Финляндии и Исландии поддерживается Советом по науке и технологиям Великобритании (грант PP/E007929/1), Финским метеорологическим институтом и Шведским институтом космической физики. Т. Йоман поддержан Советом по науке и технологиям Великобритании (грант ST/H0022480/1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гуревич А.В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1 145.
- Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
- 3. Leyser T. B. // Space Sci. Rev. 2001. V. 98. P. 223.
- 4. Благовещенская Н. Φ. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. С.-Петербург: Гидрометеоиздат, 2001. 288 с.
- 5. Фролов В. Л., Болотин И. А., Комраков Г. П. и др // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 6. С. 393.
- Грач С. М., Сергеев Е. Н., Яшнов В. А., Котов П. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 7. С. 553.
- Frolov V. L., Sergeev E. N., Ermakova E. N., et al. // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28, No. 16. P. 3 103.
- 8. Sergeev E. N., Frolov V. L., Grach S. M., Kotov P. V. // Adv. Space Res. 2006. V. 38. P. 2518.
- 9. Sergeev E., Grach S., Shindin A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110, No. 6. Art. no. 065002.
- 10. Грач С. М., Сергеев Е. Н., Шиндин А. В. и др. // Докл. АН. 2014. Т. 454, № 5. С. 526.
- 11. Mahmoudian A., Scales W. A., Bernhardt P. A., et al. // Radio Sci. 2013. V. 48, No. 6. P. 685.
- Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Йоман Т. К., Ритвельд М. Т. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 9. С. 571.
- Борисова Т. Д., Благовещенская Н. Ф., Калишин А. С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 1. С. 1.
- 14. Rietveld M. T., Kohl H., Kopka H., Stubbe P. // J. Atmos. Terr. Phys. 1993. V. 55. P. 577.
- 15. Rishbeth H., van Eyken T. // J. Atmos. Terr. Phys. 1993. V. 55. P. 525.

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин и др.

- 16. Greenwald R. A., Baker K. B., Dudeney J. R., et al. // Space Sci. Rev. 1995. V. 71. P. 761.
- 17. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/igrf_vitmo.html
- 18. http://spaceweather.com
- 19. http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp
- 20. Lehtinen M.S., Huuskonen A. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58. P. 435.
- 21. Stubbe P., Kohl H., Rietveld M. T. // J. Geophys. Res. 1992. V. 79, No. A5. P. 6285.
- 22. Stubbe P. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58. P. 349.
- Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, No. A4. P. 1 141.
- 24. Mishin E., Hagfors T., Kofman W. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, No. A12. P. 27 265.
- Blagoveshchenskaya N.F., Carlson H.C., Kornienko V.A., et al. // Ann. Geophys. 2009. V.27. P.131.
- Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Корниенко В.А. и др // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 678.
- 27. Ponomarenko P. V., Leyser T. B., Thide B. //J. Geophys. Res. 1999. V. 104, No. A5. P. 10081.
- 28. Грач С. М. Взаимодействие мощных радиоволн с ионосферой. Часть 1. Возбуждение плазменной турбулентности в верхней ионосфере. Учебное пособие. Нижний Новгород: ННГУ, 2012. 58 с.
- 29. Fejer J. A. // Rev. Geophys. Space Phys. 1979. V. 17, No. 1. P. 135.
- 30. Kuo S. P., Lee M. C., Kossey P. // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24, No. A10. P. 2969.

Поступила в редакцию 1 октября 2014 г.; принята в печать 29 марта 2015 г.

MODIFICATION EFFECTS OF THE HIGH-LATITUDE IONOSPHERIC F REGION BY HIGH-POWER HF RADIO WAVES AT FREQUENCIES NEAR THE FIFTH AND SIXTH ELECTRON GYROHARMONICS

T. D. Borisova, N. F. Blagoveshchenskaya, A. S. Kalishin, M. T. Rietveld, T. K. Yeoman, and I. Hägström

We study the modification effects of the high-latitude ionospheric F region induced by a highpower O-mode HF radio wave injected towards the magnetic zenith, at frequencies near the fifth and sixth electron gyroharmonic using the EISCAT Heating facility. Multi-instrument diagnostics with the EISCAT incoherent scatter radar (930 MHz) at Tromsø, Norway, the CUTLASS coherent radar at Hankasalmi, Finland, and stimulated electromagnetic emission (SEE) receiver at Tromsø, has been used for analysis of the observed phenomena. The behavior of the ionospheric plasma parameters (electron's density and temperature), small-scale artificial field-aligned irregularities, plasma and ion line spectra, and ionospheric SEE are analyzed in detail. Modification effects near the fifth and sixth electron gyroharmonics have been compared. The coexistence of the thermal (resonance) parametric instability, parametric decay (striction) instability, and/or oscillating two-stream instability was found at these frequencies. The excitation of instabilities occurred at altitudes close to the reflection height of the HF pump wave and at the altitudes of the upper-hybrid resonance.