УДК 533.951+537.868

ЯВЛЕНИЯ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ *F*-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ЕЁ НАГРЕВЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ЧАСТОТОЙ ВБЛИЗИ ЧЕТВЁРТОЙ ГАРМОНИКИ ГИРОЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОНОВ

T. Д. Борисова 1* , Н. Ф. Благовещенская 1 , А. С. Калишин 1 , М. Кош 2 , А. Сениор 2 , М. Т. Риетвельд 3 , Т. К. Йоман 4 , И. Хагстром 5

- 1 Арктический и антар
ктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия
 2 Ланкастерский университет, г. Ланкастер, Англия
 - 3 Европейская научная Ассоциация EISCAT, г. Тромсё, Норвегия
 - ⁴ Лейстерский университет, г. Лейстер, Великобритания
 - 5 Шведский институт космической физики, г. Кируна, Швеция

Представлены результаты комплексных исследований явлений в высокоширотной F-области ионосферы, вызванных воздействием мощной короткой радиоволны с обыкновенной поляризацией, излучаемой в направлении магнитного зенита с частотой вблизи четвёртой гармоники гирочастоты электронов при различных отношениях частоты нагрева к критической частоте слоя F_2 . По данным наблюдений спектров искусственного радиоизлучения ионосферы в килогерцовом и герцовом диапазонах частот отстроек относительно частоты волны нагрева выполнены сравнение и анализ поведения различных параметров ионосферной плазмы, а также мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей электронной концентрации. Показано, что вблизи четвёртой гармоники гирочастоты электронов одновременно могут возбуждаться как тепловая параметрическая (резонансная) неустойчивость, так и параметрическая распадная (стрикционная) неустойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

При воздействии мощного коротковолнового радиоизлучения обыкновенной поляризации (О-поляризация) на ионосферную плазму происходит широкий комплекс явлений в пространственных областях резонансного взаимодействия. Вблизи уровня отражения мощной короткой радиоволны развиваются параметрические (стрикционная и тепловая) неустойчивости, вызывающие генерацию интенсивных плазменных колебаний, повышение температуры электронов, возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, искусственное радиоизлучение ионосферы и ускорение электронов фоновой плазмы до сверхтепловых скоростей, что, в свою очередь, может приводить к искусственному оптическому излучению из возмущённой области ионосферы и искусственной ионизации плазмы [1–4].

При определённых частотах $f_{\rm H}$ мощной радиоволны в ионосфере могут реализовываться сразу два резонансных эффекта. Первый — это обычный резонанс между нагревным излучением с частотой $f_{\rm H}$ и плазменными колебаниями на верхней гибридной частоте $f_{\rm UH}$. Он возникает на определённой высоте $h_{\rm UH}$ в ионосфере, определяемой из условия $f_{\rm H}\approx f_{\rm UH}=(f_{\rm plasm}^2+f_{\rm ce}^2)^{1/2}$, где $f_{\rm plasm}$ — плазменная частота ионосферы и $f_{\rm ce}$ — гирочастота электронов на высоте $h_{\rm UH}$. Второй резонанс — это резонанс на частоте, кратной гирочастоте электронов, $f_{\rm H}=nf_{\rm ce}$. Таким образом, двойной резонанс возникает в тех областях ионосферы, где выполняется условие $f_{\rm H}=nf_{\rm ce}=f_{\rm UH}$. В пространственной области двойного резонанса очень сильно изменяются все явления, возникающие при воздействии мощной волны на ионосферу: уменьшается амплитуда мелкомасштабных ионосферных неоднородностей электронной концентрации вплоть до их полного исчезновения,

^{*} borisova@aari.ru

полностью трансформируется спектр искусственного радиоизлучения ионосферы в килогерцовом диапазоне отстроек и т. д. В работах [3, 5, 6] показано, что даже при небольшом изменении (около 1%) частоты $f_{\rm H}$ относительно гармоники $nf_{\rm Ce}$ кардинально изменяются спектральные характеристики искусственного радиоизлучения ионосферы. Подавляются некоторые компоненты в килогерцовом диапазоне отстроек от нагревной частоты: главный спектральный максимум (в английской литературе downshifted maximum, DM), узкополосная компонента (narrow continuum, NC) и сдвинутый вверх по частоте максимум (upshifted maximum, UM). В случае частоты нагревного излучения $f_{\rm H} > nf_{\rm Ce}$ формируется широкий сдвинутый в область положительных отстроек максимум искусственного радиоизлучения ионосферы (broad upshifted maximum, BUM). Природа ВUM-компоненты связана с возбуждением бернштейновских волн при двойном резонансе [1, 7, 8]. Общая ширина диапазона частот нагрева, при которых сильно искажаются эффекты модификации, составляет всего $2\div3\%$ от частоты резонанса, т. е. $100\div200$ кГц [1, 3]. Отмечается сильная зависимость наблюдаемых явлений при двойном резонансе от номера n гармоники гирочастоты [3, 5, 6].

К настоящему времени на среднеширотном нагревном стенде «Сура» систематически исследованы различные характеристики плазменной турбулентности в зависимости от отстройки частоты нагрева относительно частоты двойного резонанса для различных гармоник n [2, 9–11]. С использованием комплекса EISCAT проведены исследования для частот нагрева вблизи третьей и четвёртой гармоник гирочастоты [3, 11–14]. На мощном коротковолновом нагревном комплексе HAARP (эффективная мощность излучения до 3 600 MBт) выполнены исследования для частот нагрева вблизи второй, третьей и четвёртой гармоник электронной циклотронной частоты [15–17]. Излучение электромагнитных волн с высокой мощностью на нагревном комплексе HAARP на Аляске позволило обнаружить возбуждение искусственного радиоизлучения из ионосферы на частотах, близких к гармоникам ионной гирочастоты. Ионные волны Бернштейна генерировались, когда нагревная частота комплекса была близка частотам электронных волн Бернштейна около второй гармоники гирочастоты электронов [18].

Следует отметить, что поведение ионосферной плазмы в нагревных экспериментах для частот накачки, близких к гармоникам гирочастот ниже критической частоты слоя F_2 , изучалось в основном по спектральным характеристикам искусственного радиоизлучения ионосферы в килогерцовой полосе отстроек от частоты нагрева, а также по результатам наблюдений мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей. Имеющиеся сведения об изменениях параметров ионосферной плазмы и о характеристиках искусственного радиоизлучения ионосферы в герцовой полосе отстроек разрозненны и малочисленны.

Основной целью данной работы является комплексное исследование эффектов модификации высокоширотной F-области ионосферы при воздействии мощной короткой радиоволны обыкновенной поляризации нагревного комплекса EISCAT/Heating, излучаемой вдоль магнитного поля Земли на частотах вблизи четвёртой гармоники гирочастоты электронов. Основное внимание уделено анализу результатов наблюдений с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн в г. Тромсё (динамика температуры электронов и электронной концентрации, потоки ионов из ионосферы, развитие параметрической распадной неустойчивости) и измерений спектральных характеристик искусственного радиоизлучения ионосферы в диапазоне отстроек от десятков до сотен герц. Результаты также сопоставлены с данными одновременных измерений спектральных компонент искусственного радиоизлучения ионосферы в килогерцовом диапазоне частот отстройки и данными регистрации мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей. Поведение перечисленных характеристик при нагреве вблизи четвёртой гармоники гирочастоты электронов рассмотрено при различных отношениях частоты нагрева к критической частоте слоя F_2 с учётом отклонения антенны передатчика на 12° к югу от вертикали.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ, СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ

Эксперименты по модификации высокоширотной ионосферы выполнялись 22 и 23 февраля 2012 года при использовании нагревного комплекса EISCAT/Heating, расположенного в г. Тромсё, Норвегия (69,6° с. ш., 19,2° в. д.), излучавшего мощные короткие радиоволны О-поляризации в направлении магнитного зенита (диаграмма направленности антенны наклонена на 12° к югу от вертикали) на частотах, близких к четвёртой гармонике гирочастоты электронов. Комплекс EISCAT/Heating излучал радиоволны с 0-й по 18-ю и с 30-й по 48-ю минуты каждого часа (18-минутный нагрев, 12-минутная пауза). В экспериментах использовалась фазированная антенная решётка № 1, имеющая ширину диаграммы направленности 7° и обеспечивающая эффективную мощность излучения $P_{эфф}$ порядка 600 МВт на частоте $5\,423$ мГц [19]. В течение первых двух минут цикла нагрев проводился на частоте $f_{\rm H}=5\,300$ кГц, далее частота $f_{\rm H}$ увеличивалась до $5\,600$ кГц (на 3,125 кГц каждые 10 с).

Для диагностики явлений, инициированных воздействием мощных коротких радиоволн на высокоширотную ионосферу, использовались следующие средства наблюдений.

- 1) Радар некогерентного рассеяния радиоволн EISCAT на частоте 930 МГц в г. Тромсё [20] в режиме «beata», обеспечивающем измерения с разрешением по времени 5 с и разрешением по высоте от 3 км на высотах от 80 до 600 км. Излучение направлялось вдоль магнитного поля в г. Тромсё. Радар позволяет получить высотно-временные вариации параметров ионосферной плазмы, таких, как электронная концентрация $N_{\rm e}$, температура электронов $T_{\rm e}$ и ионов $T_{\rm i}$, скорость ионов $V_{\rm i}$. Данные радара некогерентного рассеяния обрабатывались унифицированным пакетом программ GUISDAP (Grand Unified Incoherent Scatter Design and Analysis Package [21]). Кроме того, анализ спектров сигналов некогерентного рассеяния, получаемых в период нагревных экспериментов, позволяет надёжно регистрировать инициированные нагревом плазменные линии (HF-induced plasma lines, HFPL) и усиленные нагревом ионные линии (HF-enhanced ion lines, HFIL, [22–24]).
- 2) Коротковолновый радар CUTLASS (SuperDARN), расположенный в Финляндии [25], использовался в нестандартном режиме измерений на частотах 10, 13 и 17 МГц одновременно. Радар CUTLASS излучал с помощью узконаправленной антенны с шириной луча примерно 3.3° , ориентированной на искусственно возмущённую область ионосферы над г. Тромсё (луч 5), и обеспечивал разрешение по дальности 15 км.
- 3) Высокочувствительный приёмный комплекс для регистрации искусственного радиоизлучения ионосферы в г. Тромсё, разработанный в Университете г. Ланкастер. В качестве приёмного устройства использовался приёмник USRP N210 компании «Ettus Research». Точность времени и частота контролировались в данном приёмнике с помощью помощи встроенного GPS-модуля. Приёмная антенна представляла собой резистивно-нагруженный широкополосный складной диполь, подвешенный на высоте 10 м. Сигналы регистрировались в полосе 6,25 МГц около центральной частоты приёма 6 МГц. Динамические спектры были получены путём быстрого преобразования Фурье зарегистрированных сигналов.
- 4) Ионозонд в г. Тромсё, получающий ионограммы вертикального зондирования ионосферы 1 раз в 15 минут.
- 5) Многоканальный приёмный коротковолновый доплеровский комплекс для регистрации диагностических коротковолновых радиосигналов ракурсного брэговского рассеяния, установленный в обсерватории ААНИИ «Горьковская» под Санкт-Петербургом [4].

Карта-схема на рис. 1 поясняет расположение нагревного стенда EISCAT/Heating, диагностических радиотрасс и приёмного пункта в обсерватории «Горьковская».

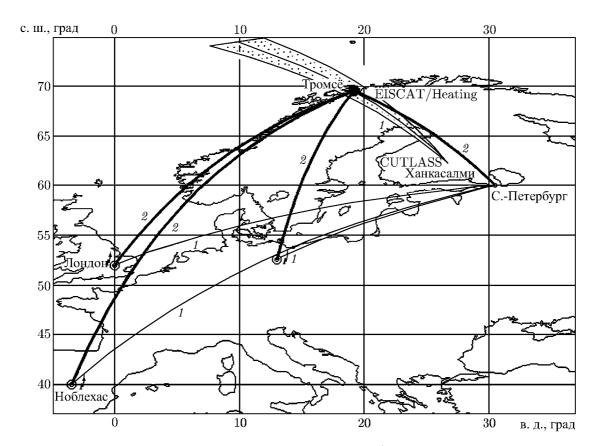


Рис. 1. Карта-схема расположения нагревного стенда EISCAT/Heating, средств диагностики и диагностических радиотрасс: тонкие линии 1 — трассы прямого распространения коротковолнового сигнала, толстые линии 2 — трассы ракурсного рассеяния

Геофизическая обстановка в период нагревных экспериментов оценивалась по данным, характеризующим солнечную (число Вольфа W [26]) и магнитную (трёхчасовые значения планетарного индекса $K_{\rm p}$ [27]) активности. Солнечная активность возрастала, и в дни наблюдений 22 и 23 февраля число W составляло 48 и 57 соответственно. Геомагнитные условия были спокойными. Трёхчасовые $K_{\rm p}$ -индексы имели величину 1,5 (22 февраля) и 0,5 (23 февраля).

По данным высотного зондирования в г. Тромсё в феврале 2012 года над нагревным стендом EISCAT/Heating наблюдалась хорошо выраженная F-область ионосферы. Для слоя F_2 треки на ионограммах высотного зондирования, измеренных 22 и 23 февраля 2012 года, были многослойными и диффузными, что характерно для вечернего времени зимней авроральной ионосферы. На высотах слоя F_2 наряду с регулярными отражениями волн различной поляризации регистрировались боковые отражения с частотами выше критической частоты слоя для волн необыкновенной поляризаций f_{F_2} . 22 февраля вместе со слоем F_2 наблюдался нерегулярный плоский спорадический слой E_8 с частотами $f_{0F_8} \geq f_{0F_2}$ (f_{0F_2} и f_{0E_8} — критические частоты для волн обыкновенной поляризации в F- и E_8 -слоях соответственно).

На рис. 2 показаны вариации частоты f_{0F_2} (сплошные линии), измеренные станцией высотного зондирования г. Тромсё с 15:00 до 17:50 UT 22 и 23 февраля 2012 года. Рассчитанные отношения частоты нагрева к критической частоте слоя F_2 с учётом наклона диаграммы направленности антенны приведены на рис. 2 пунктирными линиями (ось $f_{\rm H}\cos(12^{\circ})/f_{0F_2} \equiv f_{\rm H}/f_{0F_2'}$ расположена справа). На оси времени прямоугольниками отмечены интервалы излучения коротковолнового нагревного комплекса. Выполнение условия отражения мощной короткой радиоволны от слоя

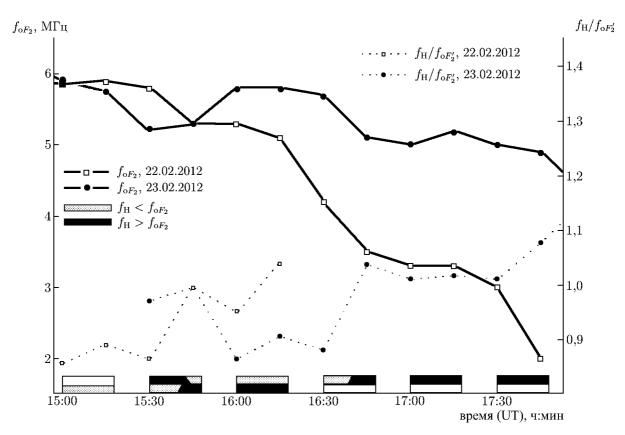


Рис. 2. Критическая частота регулярного слоя F_2 ($f_{0}F_2$) и отношение частоты нагрева к критической частоте слоя F_2 ($f_{\rm H}/f_{0}F_2'$) в нагревных экспериментах в г. Тромсё 22 и 23 февраля 2012 года с 14:55 до 17:50 UT. На оси времени прямоугольниками отмечены интервалы излучения коротковолнового нагревного комплекса EISCAT/Heating. Оттенки закраски прямоугольников характеризуют соотношение между частотами $f_{\rm H}$ и $f_{0}F_2'$ в нагревных циклах, белым цветом отмечены периоды, когда стенд не работал; нижняя половина прямоугольников соответствует эксперименту 22 февраля, верхняя — 23 февраля

 F_2 ($f_{
m H} < f_{{
m o}F_2'}$) показано серым оттенком в прямоугольниках, условия «просвечивания» мощной радиоволны ($f_{
m H} > f_{{
m o}F_2'}$) — чёрным фоном и отсутствие нагрева — белым. Отношение $f_{
m H}/f_{{
m o}F_2'}$ изменялось от 0,85 до 1,12.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Эксперименты по модификации ионосферной плазмы 22 и 23 февраля 2012 года выполнялись в ранние вечерние часы, когда критические частоты слоя F_2 плавно уменьшались. Это позволило исследовать эффекты, возникающие при нагреве на частотах вблизи четвёртой гармоники гирочастоты электронов, при различных соотношениях между частотой нагрева $f_{\rm H}$ и критической частотой $f_{\rm oF_2'}$ ($f_{\rm H} < f_{\rm oF_2'}$, $f_{\rm H} \approx f_{\rm oF_2'}$ и $f_{\rm H} > f_{\rm oF_2'}$). Различные средства и методы диагностики одновременно получали детальную информацию об ионосферной плазме (температуре и концентрации электронов), скорости потока ионов из ионосферы, особенностях развития параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости, различных спектральных компонентах искусственного радиоизлучения ионосферы и мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях.

2.1. Результаты наблюдений искусственного радиоизлучения ионосферы 22 февраля 2012 года

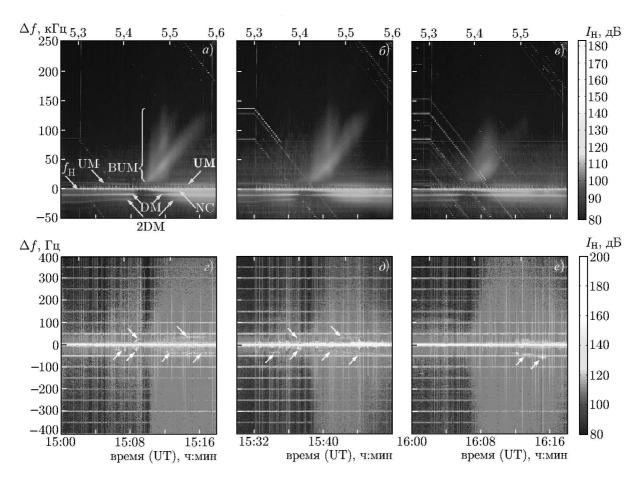
Искусственное радиоизлучение ионосферы регистрировалось в килогерцовом и герцовом диапазонах частот отстроек Δf относительно частоты нагрева. На рис. 3 приведены спектрограммы интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы в полосе частот отстроек от -50 до +250 к Γ ц (рис. 3a–e) и в полосе частот отстроек от -400 до +400 Γ ц (рис. 3e–e) для трёх последовательных циклов нагрева 22 февраля 2012 года: $15:00\div15:18$ UT (a,e), $15:30\div15:48$ UT (b,e) и $16:00\div16:18$ UT (b,e). Отношение $f_{\rm H}/f_{\rm o}F_2'$ составляло $0.86\div0.9$; $0.86\div1.0$ и $0.95\div1.04$ для первого, второго и третьего циклов нагрева соответственно (см. рис. 2). В каждом цикле нагрева мощная короткая радиоволна излучалась в течение первых двух минут на частоте $f_{\rm H}=5\,300$ к Γ ц, далее в течение 16 мин частота $f_{\rm H}$ увеличивалась на 3.125 к Γ ц каждые 10 с. На спектрограммах полоса искусственного радиоизлучения ионосферы представлена так, чтобы частота $f_{\rm H}$ в любой момент соответствовала $\Delta f=0$.

2.1.1. Характеристики искусственного радиоизлучения ионосферы в килогерцовой полосе отстроек от частоты нагрева

Как известно (см., например, [1–3] и цитируемую там литературу), в условиях двойного резонанса резко ослабевают процессы в пространственной области верхнего гибридного резонанса, что приводит к исчезновению некоторых спектральных компонент искусственного радиоизлучения ионосферы (DM-, NC- и UM-компонент) в килогерцовом диапазоне отстройки от частоты нагрева.

На спектрограмме (рис. 3a) отмечены основные спектральные компоненты искусственного радиоизлучения ионосферы, такие, как сдвинутый вниз по частоте DM-максимум и его сателлит (2DM), узкополосная компонента (NC), сдвинутый вверх по частоте UM-максимум и широкополосный сдвинутый вверх по частоте BUM-максимум. Из рис. 3a-6 следует, что во всех трёх нагревных циклах регистрировались DM- и 2DM-компоненты, а также отчётливо выделялись временные интервалы подавления DM-компонент. За момент наблюдения двойного резонанса на четвёртой гармонике гирочастоты электронов принят момент максимального подавления DMкомпоненты в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы для частот накачки $f_{\mathrm{HR}} \approx$ $pprox f_{
m UH} pprox 4f_{
m ce}$. 22 февраля 2012 года в трёх последовательных циклах нагрева DM-компонента максимально подавлялась около моментов $t_{\rm R}=15:09:10;~15:37:40$ и 16:06 UT при частотах $f_{\rm HR}=$ =5431;5400 и 5375 к Γ ц соответственно. DM-компонента подавлялась для полосы частот нагрева с шириной порядка 12,5 кГц. Степень подавления DM-компоненты в двойном резонансе зависит от отношения $f_{\rm H}/f_{{\rm o}F_2'}$. В цикле нагрева 15:00÷15:18 UT ($f_{\rm H}/f_{{\rm o}F_2'}<1$) DM-компонента полностью уменьшалась до уровня фона, $I_{\rm DM} \approx I_{\rm фон.\, k\Gamma q}$ (интенсивность фона при измерении искусственного радиоизлучения ионосферы $I_{\text{фон. к}\Gamma_{\text{ц}}} \approx 85 \div 90 \text{ дБ}$, измеренный в полосе отстроек $200 \div 250 \text{ к}\Gamma_{\text{ц}}$ в первые две минуты нагрева). При нагреве на частотах, близких к критической $(f_{\rm H}/f_{{
m o}F_3'}\approx 1),$ в цикле $15:30 \div 15:48$ UT интенсивность DM-компоненты уменьшалась, но компонента полностью не исчезала $(I_{\rm DM}/I_{\rm фон. \ k\Gamma ц} \approx 5 \div 10 \ {\rm дB})$. В цикле $16:00 \div 16:18 \ {\rm UT} \ (f_{\rm H}/f_{\rm oF_2} \geq 1) \ {\rm DM}$ -компонента наблюдалась в виде слабого следа с интенсивностью, превышающей уровень фона на $10 \div 15$ дБ. Помимо DM-компоненты, как видно из рис. 3*a*–*e*, при двойном резонансе подавлялись компоненты NC и UM. Подавление UM-компоненты наблюдалось для частот $f_{\rm H}$ ниже диапазона подавления DM-компоненты на $6\div 10$ к Γ ц. Можно видеть также (см. рис. 3a, δ) возникновение локального максимума в UM-компоненте для частот нагрева в диапазоне подавления DM-компоненты.

Для частот $f_{\rm H}$ выше резонансной частоты $f_{\rm HR}$ на $12.5\div18$ к Γ ц (при условии $f_{\rm H}>4f_{\rm ce}$) в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы появляется BUM-компонента, которая в наших



экспериментах регистрировалась в виде двух компонент (BUM1 и BUM2). Компонента BUM1 во всех трёх циклах нагрева начинала формироваться для частот, превышающих резонансную частоту $f_{\rm HR}$ на 12,5 кГц. Для представленных трёх последовательных циклов нагрева (рис. 3a–e) полоса частот $f_{\rm H}$, при которых возбуждались BUM-компоненты, составляла 140; 125 и 85 кГц соответственно. Отметим, эта полоса частот $f_{\rm H}$ существенно у́же, когда отношение $f_{\rm H}/f_{\rm o}F_2'>1$ (см. рис. 3e). Максимумы интенсивности компоненты BUM1 формировались при частотах $f_{\rm H}$ выше частоты двойного резонанса $f_{\rm HR}$ на 60 кГц, если отношение $f_{\rm H}/f_{\rm o}F_2'>1$, и примерно на 50 кГц, если отношение $f_{\rm H}/f_{\rm o}F_2'>1$. Кроме того, если отношение $f_{\rm H}/f_{\rm o}F_2'>1$, BUM2-компонента наблюдалась в узком диапазоне частот $f_{\rm H}$. По мере ослабления компоненты BUM усиливалась DM-компонента, которая достигала максимума при частоте нагрева выше резонансной частоты $f_{\rm HR}$ на $60\div80$ кГц. При этом интенсивность DM-компоненты была на $20\div25$ дБ выше, чем до двойного резонанса.

2.1.2. Характеристики искусственного радиоизлучения ионосферы в герцовом диапазоне отстроек от частоты нагрева

На рис. 3z–e приведены спектрограммы искусственного радиоизлучения ионосферы 22 февраля 2012 года в полосе отстроек от -400 до +400 Γ ц. Спектральные компоненты искусственного радиоизлучения ионосферы в герцовом диапазоне отстроек могут быть как узкополосными, так и широкополосными. Спектрограммы на рис. 3z–e, показывают, что при двойном резонансе на четвёртой гармонике гирочастоты (определяемом по максимальному подавлению интенсивности DM-компоненты) резко ослабляются все виды искусственного радиоизлучения ионосферы в герцовом диапазоне отстроек.

Для частот нагрева ниже частоты двойного резонанса ($f_{\rm H} < f_{\rm HR}$) при условии отражения мощной короткой волны от ионосферы ($f_{\rm H}/f_{\rm oF_2'} \le 1$) регистрировалось широкополосное излучение в полосе отстроек от -100 до +200 Гц. Диапазон частот нагрева, для которого наблюдалась генерация данного широкополосного излучения, соответствует диапазону частот усиления DM-компоненты (см. рис. 3a, δ и z, ∂).

Помимо широкополосного излучения, в отдельные интервалы цикла нагрева наблюдался ряд узкополосных излучений. Наиболее интенсивные узкополосные излучения (с интенсивностью более чем на 60 дБ выше фонового излучения) отмечены стрелками на рис. 3z, ∂ на частотах отстроек $-(10 \div 12)$, $\pm (22 \div 24)$ и $-(33 \div 37)$ Гц. Непосредственно перед исчезновением DM-компоненты интенсивность узкополосных излучений на частотах отстройки порядка $-(10 \div 12)$ Гц возрастала до 160 дБ. В условиях модификации ионосферы $f_{0F'_2} < f_{\rm H} < f_{\rm HR}$ подобные излучения не регистрировались. Авторы работы [18] интерпретируют частоты узкополосного излучения, соответствующие отстройкам $-(10 \div 12)$ и $\pm (24 \div 26)$ Гц, как ионно-акустические, а частотам отстройки -35 Гц — как частоты бриллюэновского рассеяния.

При нагреве в полосе выше двойного резонанса $f_{\rm HR} < f_{\rm HR} < f_{\rm HR} + (120\div150)$ кГц для любых отношений $f_{\rm H}/f_{\rm oF_2'}$ формировалось искусственное излучение в широкой полосе отстроек от -400 до +250 Гц с интенсивностью, превышающей интенсивность фонового излучения на $25\div30$ дБ. Наибольшая интенсивность искусственного радиоизлучения ионосферы в герцовом диапазоне отстроек наблюдается в полосе от -200 до +200 Гц. Возникновение широкополосной компоненты искусственного радиоизлучения ионосферы в герцовом диапазоне отстроек совпадает по времени с усилением DM-компоненты, а её ослабление — с уменьшением интенсивности DM-компоненты. Вместе с тем формирование широкополосного излучения в полосе отстроек от -100 до +200 Гц для частот нагрева ниже двойного резонанса ($f_{\rm H} < f_{\rm HR}$) также совпадает с возрастанием интенсивности DM-компоненты. Таким образом, можно предположить, что широкополосные компоненты искусственного радиоизлучения ионосферы в герцовом диапазоне отстроек формируются благодаря процессам в пространственной области верхнего гибридного резонанса.

Отметим, что для условий $f_{\rm H}/f_{\rm oF_2'}>1$ (рис. 3e) для широкой частотной полосы нагрева от $f_{\rm HR}+90$ к Γ ц до $f_{\rm HR}+180$ к Γ ц наблюдалось узкополосное искусственное излучение с переменной отстройкой по частоте от -40 до -55 Γ ц с высокой интенсивностью (на $140\div160$ д $\rm B$ выше фона). Данный вид излучения сопровождался локальным повышением интенсивности излучений на отстроенной частоте около -5 к Γ ц.

2.2. Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности

Ниже представлены результаты исследования свойств мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей в экспериментах 22 и 23 февраля 2012 года при нагреве на частотах вблизи четвёртой гармоники гирочастоты электронов. Искусственные неоднородности ди-

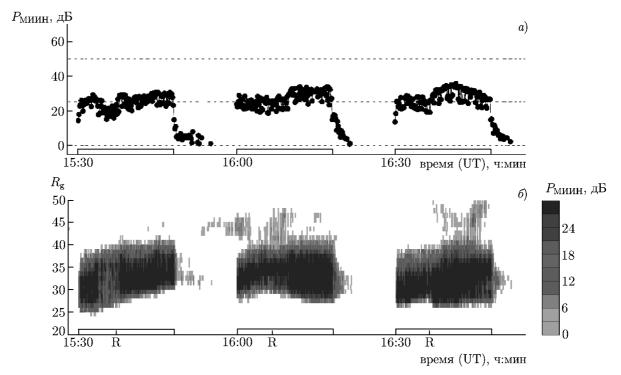
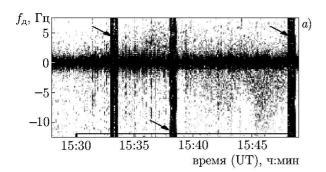
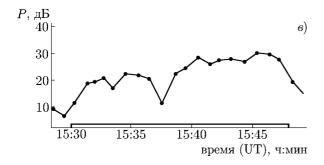


Рис. 4. Данные наблюдений с помощью когерентного коротковолнового доплеровского радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия, на частоте порядка 16,5 МГц в период нагревного эксперимента в г. Тромсё 23 февраля 2012 года с 15:28 до 16:58 UT (луч 5, ориентированный на искусственновозмущённую область ионосферы над г. Тромсё). Динамика мощности рассеянных сигналов от времени для фиксированной дальности (номер ворот $R_{\rm g}=33$) от Ханкасалми до искусственно возмущённой области ионосферы над г. Тромсё (а). Вариации мощности рассеянных сигналов в координатах дальность (номер ворот $R_{\rm g}$)—мировое время (б). Циклы нагрева отмечены скобками на оси времени

агностировались с помощью когерентного коротковолнового доплеровского радара CUTLASS (SuperDARN) в Ханкасалми (Финляндия) и многоканального коротковолнового доплеровского комплекса на станции «Горьковская» методом ракурсного рассеяния на неоднородностях диагностических коротковолновых сигналов для сети радиотрасс (см. карту на рис. 1).

На рис. 4 показаны данные наблюдений с помощью радара CUTLASS в Ханкасалми 23 февраля 2012 года с 15:28 до 16:58 UT. Измерения выполнялись на частоте 16,5 МГц и дали информацию о свойствах мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с поперечными к магнитному полю размерами $l_{\perp}\approx 8$ м. Рисунок 4a демонстрирует зависимость мощности рассеянных сигналов от времени в искусственно возмущённой области ионосферы над г. Тромсё. Рисунок 4b иллюстрирует динамику мощности рассеянных сигналов в координатах дальность—мировое время. Рассеянные сигналы регистрировались в интервале дальностей от 780 до 1 230 км (это соответствует номерам ворот с 20 до 50). Дальность до центра искусственно возмущённой области ионосферы над г. Тромсё соответствует 33-им «воротам» (Range gate, $R_{\rm g}$). Из рис. 4 видно, что во время эксперимента регистрировались интенсивные ракурсно-рассеянные по направлению искусственными неоднородностями сигналы. 23 февраля время наблюдения двойного резонанса определялось по максимальному подавлению мощности рассеянных на неоднородностях сигналов $P_{\rm MИИH}$. При частотах нагрева ниже двойного резонансе мощность $P_{\rm MИИH}$ уменьшалась на 5÷10 дВ. При частотах нагрева $f_{\rm H} > f_{\rm HR}$ максимальная мощность рассеянных на неоднородно-





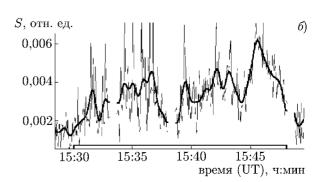


Рис. 5. Сравнение поведения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей по данным наблюдений методом ракурсного рассеяния и с помощью коротковолнового радара CUTLASS в период нагревного эксперимента в г. Тромсё 22 февраля 2012 года с 15:28 до 15:50 UT. Динамические доплеровские спектры диагностических коротковолновых сигналов на частоте 15 585 кГц на трассе Ноблехас—Тромсё— Санкт-Петербург (а); временные вариации спектральной мощности рассеянных сигналов $S(\theta)$; динамика мощности Р рассеянных сигналов по данным радара CUTLASS в Ханкасалми на частоте 12,5 МГц для дальностей, соответствующих расстоянию до искусственно возмущённой области ионосферы над г. Тромсё (в). На панели (а) более тёмный оттенок соответствует большим значениям S

стях сигналов достигала 30÷35 дБ.

На рис. 5a и δ в качестве примера представлены результаты измерений методом ракурсного рассеяния 22 февраля 2012 года с 15:28 до 15:50 UT на станции «Горьковская» на трассе Ноблехас—Тромсё—Санкт-Петербург для диагностической частоты $f_{\rm диагн}=15\,585$ кГц. На рис. 5a показаны динамические доплеровские спектры рассеянного радиосигнала, на рис. 56 — временные вариации интегральной мощности рассеянного сигнала, рассчитанной в полосе $f_{\rm д}$ от -10 до 5 Гц, исключая полосу основного сигнала ± 2 Гц. Распространению «прямого» сигнала из Ноблехаса в Санкт-Петербург соответствует нулевая доплеровская частота $f_{\rm д}$. Для сравнения на рис. 5a приведена динамика мощности рассеянных сигналов для дальностей, соответствующих расстоянию до искусственно возмущённой области ионосферы над г. Тромсё, одновременно измеренной радаром CUTLASS (Ханкасалми) на частоте 12,5 МГц (это соответствует масштабу рассеивающих неоднородностей $l_{\perp}\approx 12$ м). Период излучения стенда EISCAT/Heating отмечен скобкой на оси времени.

Сравнивая рис. 4a и 5e, можно видеть, что при нагреве вблизи четвёртой гармоники гирочастоты с более крупными масштабами ($l_{\perp} \approx 12$ м), подавляются сильнее, чем сигналы, рассеянные на неоднородностях с более мелкими масштабами ($l_{\perp} \approx 8$ м). Так, если при двойном резонансе мощность рассеянных на неоднородностях сигналов на частоте 12,5 МГц уменьшалась на $12 \div 15$ дБ, то на частоте 16,5 МГц — только на $5 \div 10$ дБ. Уменьшение мощности рассеянных на неоднородностях сигналов по данным радара CUTLASS в Ханкасалми совпадает с данными метода ракурсного рассеяния диагностических коротковолновых сигналов. Данное уменьшение происхо-

дит одновременно с началом двойного резонанса (определяемым по подавлению DM-компоненты в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы).

2.3. Эффекты при нагреве на четвёртой гармонике гирочастоты электронов по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн

В период февральских экспериментов радар некогерентного рассеяния EISCAT в г. Тромсё позволил получить детальную информацию об ионосферной плазме на высотах слоя F_2 (как ниже, так и выше максимума слоя). Луч радара был ориентирован вдоль магнитного поля Земли.

На рис. 6 и 7 показаны результаты измерений радара некогерентного рассеяния в виде высотно-временных распределений электронной концентрации $N_{\rm e}$ (панели a) и температуры электронов $T_{\rm e}$ (панели b) на высотах от 100 до 600 км для 22 (рис. 6) и 23 (рис. 7) февраля 2012 года. Расчёты выполнены с интервалом усреднения 60 с. Динамика скоростей ионов $V_{\rm i}(t)$ (панели b) представлена для шести высот в ионосфере от 390 км до 520 км (тонкие линии); толстая линия соответствует медианной кривой $V_{\rm i}(t)$. На оси времени скобками отмечены циклы нагрева и для 22 февраля буквой R показаны моменты регистрации двойного резонанса по данным искусственного радиоизлучения ионосферы. Моменты двойного резонанса для 23 февраля (ввиду отсутствия результатов измерений искусственного радиоизлучения ионосферы) оценены по времени максимального подавления мощности рассеянных на искусственных неоднородностях сигналов (см. раздел 2.2).

Из рис. 6 и 7 следует, что при двойном резонансе значимое уменьшалась температура электронов $T_{\rm e}$ на $1\,000 \div 2\,500$ K в широком интервале высот до $200 \div 250$ км как ниже, так и выше максимума слоя F_2 ионосферы. Диапазон частот нагрева $\Delta f_{\mathrm{H}\,T_{\mathrm{e}}}$, при которых уменьшалась температура $T_{
m e}$, зависит от отношения $f_{
m H}/f_{{
m o}F_2'}$. Диапазон $\Delta f_{{
m H}\,T_{
m e}}$ становился наиболее узким при нагреве вблизи критической частоты $f_{{
m o}F_2'}$ ($\mathring{f}_{
m H} \approx f_{{
m o}F_2'}$, 15:30÷15:48 UT). При $f_{
m H}/f_{{
m o}F_2'} \leq 1$ начало уменьшения температуры $T_{\rm e}$ совпадает с началом подавления DM-компоненты искусственного радиоизлучения ионосферы, а при отношении $f_{\rm H}/f_{{
m o}F_2'}>1$ температура $T_{
m e}$ начинает уменьшаться при частотах нагрева $f_{\rm H}$ ниже резонансной частоты $f_{\rm HR}$ на $38 \div 40$ к Γ ц. Спад температуры электронов при двойном резонансе наблюдался при частотах нагрева $f_{\rm H}$ от $f_{\rm HR}-(10\div40)$ к Γ ц $f_{\rm HR} + (50 \div 95)$ к Γ ц в зависимости от отношения $f_{\rm H}/f_{{
m o}F_2'}$. На фоне понижения температуры $T_{
m e}$ на высотах вблизи h_{UH} наблюдались локальные кратковременные возрастания T_{e} на $1\,500 \div 2\,000~\mathrm{K}$ при частоте нагрева выше частоты $f_{\rm HR}$ на $40\div75~{\rm k\Gamma}$ ц. Локальные увеличения температуры $T_{\rm e}$ совпадали по времени с максимальной интенсивностью ВИМ-компоненты. Понижения температуры $T_{
m e}$ сопровождались повышением электронной концентрации $N_{
m e}$ на $15 \div 20\,\%$ в диапазоне высот от $h_{\rm UH}$ до высот максимума слоя F_2 . Концентрация $N_{\rm e}$ возрастала в области выше 100 км, когда частота нагрева была близка к критической частоте слоя F_2 ($f_{\rm H}/f_{{
m o}F_2'}\approx 0.95\div 1.05$). Отметим, что увеличение концентрации $N_{\rm e}$ ранее также наблюдалось в экспериментах на нагревном комплексе EISCAT/Heating в г. Тромсё, когда частота нагрева была близка к третьей гармонике гирочастоты электронов и критической частоте слоя F_2 [13, 14].

Скорость потока ионов V_i вдоль магнитного поля характерно возрастала примерно до 150 м/с на ионосферных высотах выше 350 км в экспериментах 22 и 23 февраля 2012 года, что инициировалось воздействием мощных коротких радиоволн на высокоширотную ионосферу. По данным радара некогерентного рассеяния увеличение гидродинамической скорости V_i свыше 100 м/с свидетельствует о выносе ионов из высокоширотной F-области ионосферы в магнитосферу [28]. Вынос ионов из ионосферы исследовался в нагревных экспериментах в г. Тромсё в годы максимума и минимума солнечной активности при спокойных и возмущённых магнитных условиях [4, 23, 29–31]. В данной работе впервые рассмотрено поведение ионных потоков при нагреве вблизи

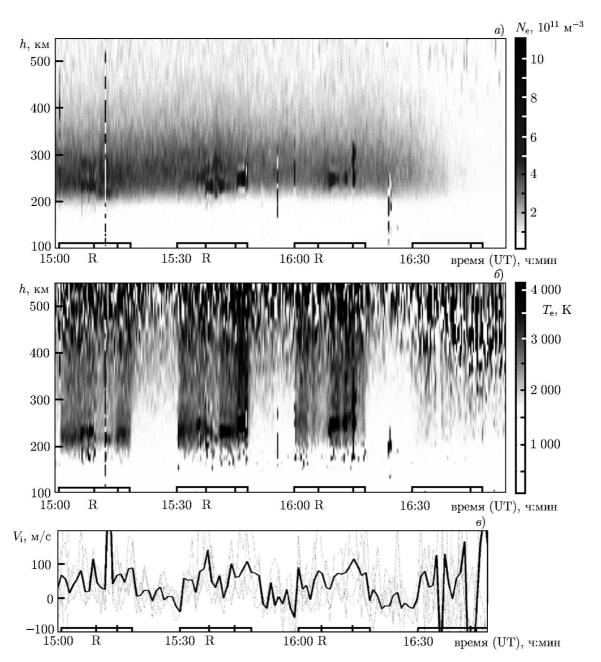


Рис. 6. Высотно-временно́е распределение электронной концентрации $N_{\rm e}$ (a), температуры электронов $T_{\rm e}$ (б) и скоростей потока ионов $V_{\rm i}$ (в) по данным радара некогерентного рассеяния в г. Тромсё на частоте 930 МГц в диапазоне высот от 100 до 600 км в эксперименте 22 февраля 2012 года

четвёртой гармоники гирочастоты электронов ($f_{\rm H} \approx 4 f_{\rm ce}$). Как следует из рис. 6 и 7, при двойном резонансе ($f_{\rm H} \approx f_{\rm HR} \approx f_{\rm UH} \approx 4 f_{\rm ce}$) локально уменьшалась скорость $V_{\rm i}$, что свидетельствует о подавлении выноса ионов. Диапазон частот $f_{\rm H}$, при которых проявлялись характерные особенности в поведении ионосферной плазмы при двойном резонансе, сужался при нагреве вблизи критической частоты слоя F_2 ($f_{\rm H}/f_{\rm o}F_2' \approx 1$).

На рис. 8 приведены ионосферные параметры, вычисленные по данным радара некогерентного рассеяния EISCAT 22 февраля 2012 года с 14:59 до 16:20 UT, усреднённые на 30-секундных интервалах. Отметим, что в расчётах использованы только данные, для которых параметр до-

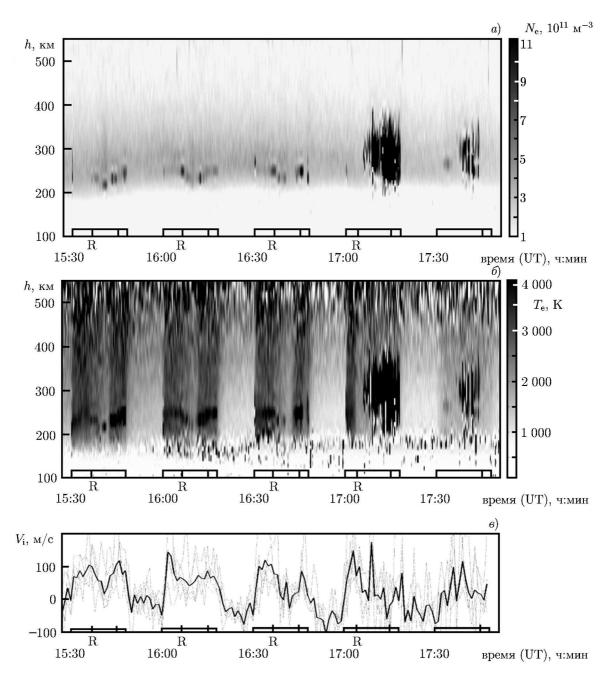


Рис. 7. То же, что на рис. 6, для 23 февраля 2012 года

стоверности определения радаром характеристик ионосферной плазмы не превышает 2 [21]. На рис. 8a показаны вариации критической частоты f_{0F_2} , рассчитанные по данным радара некогерентного рассеяния (сплошные линии 2) и измеренные ионозондом высотного зондирования в г. Тромсё, которые принимались как «фоновые» (пунктирная линия 1). Для наглядности показана временная динамика частоты нагрева $f_{\rm H}$ (штриховые линии 3). На зависимости $f_{\rm H}(t)$ отмечены частоты $f_{\rm H}$, для которых выполняются условия двойного резонанса вблизи четвёртой гармоники гирочастоты при условии $|(f_{\rm H}-4f_{\rm ce}/(4f_{\rm ce})|\leq 2\,\%$ на высоте верхнегибридного резонанса (белые кружки) и в области отражения мощной радиоволны (белые треугольники). В расчётах использовалась модель [32] высотного распределения гирочастоты электронов $f_{\rm ce}(h)$. На рис. 8a показана

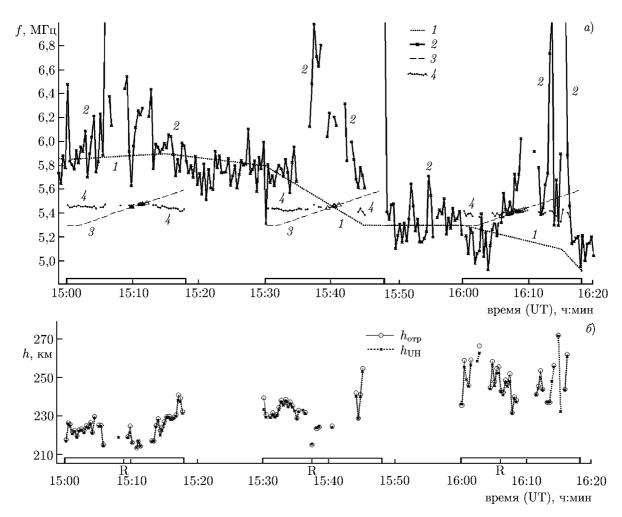


Рис. 8. Расчитанные ионосферные параметры по данным радара некогерентного рассеяния в г. Тромсё 22 февраля 2012 года с 14:55 до 16:20 UT. Панель (a) — временные вариации критических частот слоя F_2 по данным радара некогерентного рассеяния и ионозонда, а также изменение частоты нагрева $f_{\rm H}$. Значками на кривых β отмечены частоты нагрева $f_{\rm H}$, для которых выполняются условия двойного резонанса в области верхнего гибридного резонанса ($f_{\rm H} = f_{\rm UH} \approx 4 f_{\rm ce}$), значки «о», и в области отражения мощной радиоволны ($f_{\rm H} \approx f_{\rm плазм} \approx 4 f_{\rm ce}$), значки « Δ ». Пунктирная кривая β 0 соответствует критической частоте β_{oF_2} по данным высотного зондирования, сплошные кривые β 1 частоте нагрева β 1, кривые β 4 модельному значению гармоники β 5 на высоте β 6. Высота отражения мощной радиоволны (β 6) и высота верхнего гибридного резонанса (β 7). Циклы нагрева отмечены скобками на оси времени

также линиями 4 зависимость гармоники $4f_{\rm ce}(t)|_{h=h_{\rm UH}}$ на высоте верхнего гибридного резонанса по данным радара и работы [32]. Высота отражения волны накачки $h_{\rm orp}$ с учётом изменения частоты $f_{\rm H}$ и высота верхнего гибридного резонанса $h_{\rm UH}$ в зависимости от времени приведены на рис. 8 δ . На оси времени буквой R отмечены моменты регистрации двойного резонанса на четвёртой гармонике гирочастоты электронов по данным искусственного радиоизлучения ионосферы. Отметим также, что для частот $f_{\rm H}$ как ниже, так и выше двойного резонанса наблюдался резкий нагрев электронов на высотах $h_{\rm orp}$ и $h_{\rm UH}$: температура $T_{\rm e}$ увеличивалась на $50 \div 200\,\%$ по сравнению с фоновыми значениями.

2.4. Особенности развития параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости

Анализ спектров некогерентно рассеянных сигналов позволяет надёжно регистрировать инициированные искусственным нагревом плазменные линии (HF-induced plasma lines, HFPL) и усиленные нагревом ионные линии (HF-enhanced ion lines, HFIL). Генерация таких линий прямо доказывает развитие параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости на высотах вблизи отражения мощной радиоволны от ионосферы [12, 22, 23, 33].

На рис. 9 приведены данные измерений с помощью радара некогерентного рассеяния высотновременных распределений необработанных значений концентрации электронов $N_{\rm e}$ (мощности рассеянных сигналов) с разрешением по высоте порядка 1,5 км. Как видно из рис. 9, при включении нагревного комплекса во всех анализируемых циклах накачки наблюдался кратковременный всплеск усиленных нагревом ионных линий независимо от отношения $f_{\rm H}/f_{\rm oF_2'}$. Это является типичным проявлением параметрической распадной неустойчивости в нагревных экспериментах и не связано с эффектами вблизи двойных резонансов. При нагреве вблизи четвёртой гармоники гирочастоты интенсивность некогерентно рассеянных сигналов радара резко возрастала на $2\div 4$ порядка по сравнению с интенсивностью тех же сигналов в паузе до нагрева, что свидетельствовало о возбуждении усиленных нагревом ионных линий. Появление этих линий на постоянной высоте совпадало с возрастанием интенсивности DM-компоненты при частотах нагрева $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$.

Усиленные нагревом ионные линии отличались расщеплением по высоте на два трека при нагреве на частотах вблизи двойного резонанса $4f_{\rm ce} \approx f_{\rm UH} = f_{\rm HR} \leq f_{\rm H} \leq f_{\rm o} F_2'$. Будем называть трек, существовавший до двойного резонанса, первым (HFIL1), а возникший во время двойного резонанса — вторым (HFIL2). После расщепления оба трека снижаются по высоте из-за увеличения электронной концентрации $N_{\rm e}$ в области воздействия мощного коротковолнового радиоизлучения. Первый трек HFIL1 снижается медленнее и, опустившись на 5÷10 км, исчезает. Сравнение рис. 3 и 9a показывает, что в период одновременного существования двух треков от усиленных нагревом ионных линий формируется широкополосная структура излучения в герцовом диапазоне отстроек при частотах нагрева $f_{\rm H} > F_{\rm HR}$. Когда широкополосное излучение в герцовом диапазоне расширяется более чем до $\pm (120 \div 150)$ Γ ц, трек HFIL1 исчезает. Второй трек HFIL2 сначала опускается, а потом поднимается к исходной высоте при изменении нагревной частоты $f_{
m HR}$ от $f_{
m HR}$ до $f_{\rm HR} + (110 \div 130)$ к Γ ц. При последовательном увеличении частоты $f_{\rm H}$ каждые 10 с трек HFIL2 снижался на 1,0÷1,5 км. Время наблюдения трека HFIL2 соответствует периоду существования компоненты BUM излучения килогерцового диапазона. Одновременно с минимальной высотой трека HFIL2 регистрировалась максимальная интенсивность компоненты BUM1 (см. рис. 9a и 3a-6). Отметим, что интенсивность компоненты BUM1 превышала фоновые значения для частот нагрева $f_{\rm H}$, при которых наблюдались линии HFIL2. Кроме того, при тех же частотах нагрева наблюдалось резкое локальное увеличение температуры электронов $T_{\rm e}$. При нагреве на частотах ниже или вблизи критической частоты слоя F_2 ($f_{\rm H}/f_{
m oF_2'} \le 1{,}0$) температура $T_{
m e}$ возрастает в области высот около $h_{\rm UH}$. Трек HFIL2 снижался максимум на $18 \div 20$ км, что соответствует изменению гирочастоты электронов $f_{ce}(h)$ примерно на $10 \div 12$ к Γ ц; последняя величина сопоставима с нижней гибридной частотой ионосферы. Отметим, что интенсивность усиленных нагревом ионных линий была максимальной при нагреве высокоширотной F-области ионосферы на частотах вблизи критической частоты $(f_{\rm H} \approx f_{{
m o}F_2})$.

Помимо усиленных нагревом ионных линий, при частоте накачки вблизи четвёртой гармоники гирочастоты радар некогерентного рассеяния регистрировал нагревом плазменные линии на частотах нагрева $f_{\rm H} \pm 100~{\rm k}\Gamma$ ц в широком диапазоне частот изменения усиленных плазменных линий $f_{\rm HFPL}$ от $f_{\rm H}$ до $f_{\rm H} + (200 \div 250)~{\rm k}\Gamma$ ц. В случае частот нагрева, близких к двойному

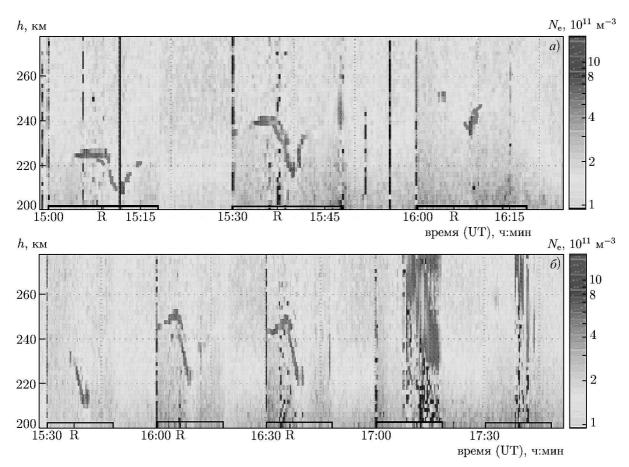


Рис. 9. Высотно-временны́е распределения мощности некогерентно рассеянных сигналов радара (необработанные значения концентрации электронов $N_{\rm e}$) с разрешением по высоте порядка 1,5 км в экспериментах 22 (a) и 23 (δ) февраля 2012 года в интервале высот от 200 до 278 км (частота волны нагрева изменялась вблизи четвёртой гармоники гирочастоты электронов). Циклы нагрева отмечены скобками на оси времени

резонансу, плазменные линии возбуждались на частоте нагрева $f_{\rm H}$.

3. ОБОБЩЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 1 обобщены данные, описывающие параметры ионосферной плазмы $(N_{\rm e},\,T_{\rm e},\,V_{\rm i})$, поведение усиленных нагревом ионных линий, спектральных компонент искусственного радиоизлучения ионосферы в килогерцовом (компоненты DM, NC, BUM1, BUM2) и герцовом (широкополосное и узкополосные излучения) диапазонах частот отстроек, а также поведение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей. Обобщение сделано для фоновых условий, когда отношение частоты нагрева $f_{\rm H}$ к критической частоте слоя F_2 с учётом наклона антенны стенда находилось в интервале $0.89 < f_{\rm H}/f_{\rm o}F_2' < 1.05$. Для сравнения в табл. 1 выделены условия, когда нагрев проводился на частотах $f_{\rm H}$ ниже, вблизи и выше частоты двойного резонанса $f_{\rm HR}$. Напомним, что за момент двойного резонанса принято максимальное уменьшение интенсивности DM-компоненты в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы или мощности $P_{\rm MИИH}$ рассеянных на искусственных неоднородностях сигналов. Представленные в табл. 1 данные проиллюстрированы в виде схемы на рис. 10 для качественного сопоставления динамики наблюдаемых эффектов по мере увеличения частоты $f_{\rm H}$.

Таблица 1. Явления в высокоширотной F-области и
оносферы, возникающие при нагреве на частотах вблизи четвёртой гармоники гиро
частоты электронов, для условий $0.89 < f_{\rm H}/f_{\rm o}F_2' < 1.05$

Соотношение	Наблюдаемые явления	Полоса частот $f_{\rm H} = f_{\rm H1} \div f_{\rm H2}$	
между $f_{\rm H}$ и $f_{\rm HR}$	и их характеристики	относительно $f_{ m HR}$	
7 0 311 31110	1 1	$f_{ m H1}$	$f_{ m H2}$
$f_{ m H} < f_{ m HR}$	Усиление I_{DM} на $10 \div 15$ дБ	$f_{\rm HR} - (40 \div 60) \ {\rm к} \Gamma {\rm ц}$	$f_{\rm HR}-6$ к Γ ц
<i>y</i> 11 <i>y</i> 1110	и $P_{ m MИИH}$ на $3{\div}5$ дБ		JIII
	Появление усиленных нагревом	$f_{\rm HR} - (100 \div 120) \ к \Gamma$ ц	$f_{ m HR}$
	ионно-акустических линии HFIL1	VIII ()	<i>y</i> 1110
	Наблюдение узкополосных	$f_{\rm HR} - (50 \div 30) \ к \Gamma$ ц	$f_{ m HR}$
	излучений на отстройках		•
	-10, -20, -40 Гц		
$f_{ m H} pprox f_{ m HR}$	Ослабление I_{DM} на $15 \div 25$ дБ	$f_{ m HR}-6$ к Γ ц	$f_{\rm HR}+6$ к Γ ц
	Ослабление $I_{\rm UM}$ на $15 \div 25$ дБ	$f_{ m HR}-16$ к Γ ц	$f_{ m HR}+46$ к Γ ц
	Ослабление $I_{ m NC}$ на $15{\div}25$ дБ	$f_{ m HR}-6$ к Γ ц	$f_{ m HR}+20$ к Γ ц
	Уменьшение $T_{\rm e}$ на $30 \div 50\%$	$f_{ m HR}$	$f_{ m HR}+12,\!5$ к Γ ц
	Подавление выноса ионов	$f_{ m HR}-6$ к Γ ц	$f_{ m HR}+6$ к Γ ц
	Ослабление $P_{ m MИИH}$ на $5{\div}10$ дБ	$f_{ m HR}-6$ к Γ ц	$f_{\rm HR}+6$ к Γ ц
	Подавление узкополосных	$f_{ m HR}-6$ к Γ ц	$f_{\rm HR}+6$ к Γ ц
	излучений на отстройках	Jiii	Jiii .
	-(10÷40) Гц		
	Возникновение широкополосной	$f_{ m HR}$	$f_{\rm HR} + (30 \div 40) \ к \Gamma$ ц
	компоненты излучения.	Jiiit	JIII(() ,
	Максимальное уширение полосы		
	отстроек до $(-400 \div + 250)$ Гц		
	Возбуждение HFIL2	$f_{ m HR}$	$f_{\rm HR} + (20 \div 40) \ к \Gamma$ ц
	и одновременное	y III c	
	существование HFIL1		
	Увеличение $N_{ m e}$ на $15 \div 20\%$	$f_{ m HR}$	$f_{ m HR}+75~ m k\Gamma$ ц
$f_{ m H} > f_{ m HR}$	Регистрация компоненты BUM1	$f_{\rm HR} + 9 \ \kappa \Gamma$ ц	$f_{\rm HR} + (85 \div 125) \ к \Gamma$ ц
<i>y</i> 11 <i>y</i> 1110	Регистрация компоненты BUM2	$f_{\rm HR} + (15 \div 18) \ \kappa \Gamma$ ц	$f_{\rm HR} + (65 \div 75) \ \kappa \Gamma$ ц
	Формирование максимума (пика)	$f_{\rm HR} + 45 \ m k\Gamma ц$	$f_{ m HR}+55~ m k\Gamma$ ц
	интенсивности BUM-компоненты	V V	V
	$I_{ m BUMmax}$		
	Усиление I_{DM} на $35{\div}40~\mathrm{дБ}$	$f_{ m HR}+60$ к Γ ц	$f_{\rm HR}+95~{ m k}\Gamma$ ц
	и $P_{ m MИИH}$ на $10{\div}20$ дБ	•	•
	Наблюдение широкополосного	$f_{\rm HR} + (30 \div 40) \ \kappa \Gamma$ ц	$f_{\rm HR} + (120 \div 150) \ к \Gamma$ ц
	излучения в полосе отстроек	V V	V ()
	$-400 \div + 250 \ \Gamma$ ц		
	$ m У$ меньшение $T_{ m e}$	$f_{ m HR}$	$f_{\rm HR} + (50 \div 95) \ к \Gamma$ ц
	Всплеск температуры $T_{ m e}$ на фоне	$f_{\rm HR} + 40 \ \kappa \Gamma$ ц	$f_{ m HR}+75$ к Γ ц
	её уменьшения на высоте h_{UH} ,	,	,
	•		
	компоненты $I_{\rm BUMmax}$, выносом		
	ионов и минимальной высотой		
	Наличие HFIL2	$f_{ m HR}$	$f_{\rm HR} + (110 \div 130) \ к \Gamma$ ц
	Наличие HFIL1		
	её уменьшения на высоте $h_{\rm UH}$, сопровождаемого наличием компоненты $I_{\rm BUMmax}$, выносом ионов и минимальной высотой регистрации трека HFIL2 Наличие HFIL2	f _{HR} + 40 κΓιι f _{HR} —	$f_{\rm HR} + 75~{ m k}\Gamma$ ц $f_{\rm HR} + (110 \div 130)~{ m k}\Gamma$ ц $f_{\rm HR} + (140 \div 150)~{ m k}\Gamma$ ц

Включение нагревного комплекса на частоте $f_{\rm H} < f_{\rm HR}$ приводило к генерации искусственных неоднородностей, появлению DM-компоненты в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы, сильному возрастанию температуры электронов $T_{\rm e}$ и возрастанию скоростей потока ионов

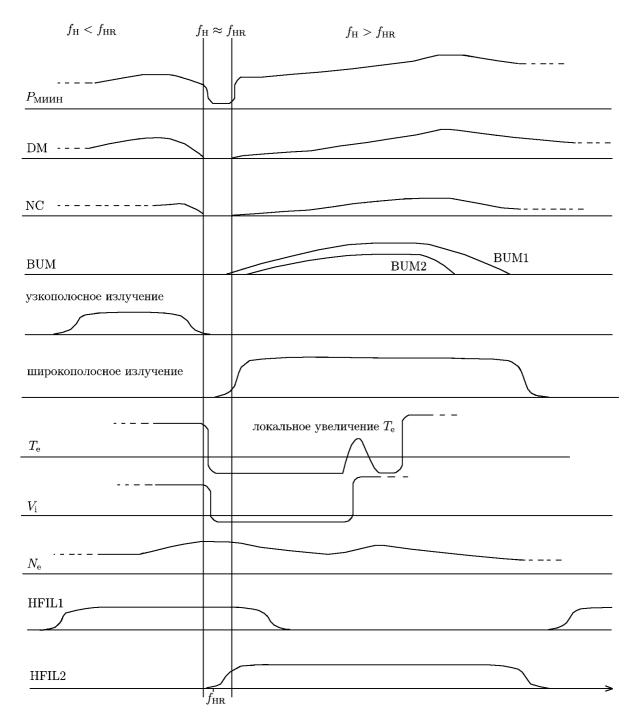


Рис. 10. Качественная картина поведения различных спектральных компонент искусственного радиоизлучения ионосферы в килогерцовом и герцовом диапазонах частот отстройки, искусственных неоднородностей, параметров ионосферной плазмы $(T_{\rm e},\,V_{\rm i},\,N_{\rm e})$ и ионных линий при нагреве ионосферы на частотах вблизи четвёртой гармоники гирочастоты электронов по мере роста частоты $f_{\rm H}$ $(f_{\rm H} < f_{\rm HR},\,f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$ и $f_{\rm H} > f_{\rm HR})$

 $V_{\rm i}$, свидетельствующему о выносе ионов из ионосферы под воздействием мощной радиоволны. Все перечисленные явления типичны для нагрева ионосферы мощной короткой радиоволной О-поляризации и не связаны с эффектами гирорезонанса.

В экспериментах 22 и 23 февраля 2012 года при частотах нагрева ниже частоты четвёртой гармоники гирочастоты электронов на 100÷120 кГц появлялись усиленные нагревом ионные линии первого типа (HFIL1) в спектре некогерентно рассеянных сигналов, которые регистрировались вплоть до начала двойного резонанса. Появление линий HFIL1 свидетельствует о развитии параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости, при которой мощная электромагнитная волна распадается на две плазменные: ленгмюровскую и ионную акустическую волны.

Для частот $f_{\rm H}$ в диапазоне от $f_{\rm HR}$ – $(30\div60)$ к Γ ц до $f_{\rm HR}$ (ниже двойного резонанса) увеличивались амплитуды интенсивностей искусственных неоднородностей и интенсивность DM-компоненты, а также возникали узкополосные компоненты искусственного радиоизлучения ионосферы в герцовом диапазоне отстроек — около частот -10, ±20 и -35 Γ ц.

При двойном резонансе ($f_{\rm H} \approx f_{\rm HR}$) начинает спадать температура $T_{\rm e}$, подавляется мощность рассеянных на искусственных неоднородностях диагностических сигналов, уменьшается скорость ионов $V_{\rm i}$, а также увеличивается концентрация электронов $N_{\rm e}$ и нарастает широкополосная компонента в искусственном радиоизлучении ионосферы в герцовом диапазоне отстроек. DM-компонента полностью исчезала (или существенное ослаблялась) в полосе частот нагрева с шириной примерно 12,5 кГц. Характерной особенностью поведения усиленных нагревом ионных линий в этих условиях являлось их расщепление по высоте на два трека. При частотах нагрева в полосе от $f_{\rm HR}+65$ кГц до $f_{\rm HR}+85$ кГц выше двойного резонанса, ($f_{\rm H}>f_{\rm HR}$) генерируются компоненты BUM1 и BUM2 в искусственном радиоизлучении ионосферы. Генерация BUM-компонент связана с возбуждением бернштейновских волн. Для частот нагрева ниже двойного резонанса ($f_{\rm H}<4f_{\rm ce}$) бернштейновские моды ещё не возбуждаются [1, 34, 35].

При частотах нагрева выше двойного резонанса возникала широкополосная компонента искусственного радиоизлучения ионосферы в герцовой полосе отстроек от -400 до +250 Гц. Для диапазона частот нагрева от $f_{\rm HR}$ и выше $f_{\rm HR}$ на $110\div130$ кГц характерно появление только усиленных нагревом ионных линий второго типа (HFIL2) в спектре некогерентно рассеянных сигналов радара. Интенсивность линий HFIL2 превышает в $10^2\div10^4$ раз интенсивность ионных линий в периоды без нагрева, что свидетельствует о развитии параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости. Для частот нагрева в диапазоне от $f_{\rm HR}+40$ кГц до $f_{\rm HR}+75$ кГц локально повышается температура электронов $T_{\rm e}$, что сопровождается максимальной (за цикл нагрева) интенсивностью ВИМ-компонент и началом возрастания скоростей выноса ионов $V_{\rm i}$. В этих условиях высота, на которой регистрируются линии HFIL2, достигает минимальных значений. Интенсивность DM-компоненты и мощность рассеянных на искусственных неоднородностях сигналов достигают своих максимумов для частот нагрева, превышающих частоту двойного резонанса на $60\div80$ кГц.

Важно подчеркнуть, что для широкого диапазона частот нагрева (около 200 кГц в окрестности четвёртой гармоники гирочастоты) одновременно регистрируются мелкомасштабные искусственные неоднородности электронной концентрации, а также линии HFIL1 и/или HFIL2, что указывает на одновременное существование тепловой параметрической неустойчивости и параметрической распадной (стрикционной) неустойчивостей.

При частотах нагрева, превышающих частоту двойного резонанса на $140 \div 150$ кГц, исчезают ВИМ-компоненты, широкополосное излучение в герцовой полосе отстроек и линии HFIL2, что свидетельствует об исчезновении эффектов от двойного резонанса. В этом случае регистрируются мелкомасштабные искусственные неоднородности электронной концентрации, DM-компонента, вынос ионов из ионосферы, возмущения температуры $T_{\rm e}$, а также линии HFIL1 аналогично началу цикла нагрева.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируем результаты комплексного исследования явлений в высокоширотной F-области ионосферы, возникающих при её нагреве в направлении магнитного зенита радиоволной с частотой вблизи четвёртой гармоники гирочастоты электронов ($f_{\rm H}=4f_{\rm ce}$).

Полученные результаты свидетельствуют об одновременном существовании тепловой параметрической и параметрической распадной неустойчивостей в широком диапазоне изменения частоты нагрева около частоты двойного резонанса (до 200 кГц).

Для частот нагрева около частоты двойного резонанса существенно изменялся спектр искусственного радиоизлучения ионосферы: подавлялась интенсивность компонент DM, NC и UM, уменьшалась амплитуда искусственных неоднородностей электронной концентрации, ослаблялись все виды искусственного радиоизлучения ионосферы в герцовой полосе отстроек, уменьшалась температура электронов, раздвоялись ионные линии по высоте, подавлялся поток ионов из ионосферы на высотах выше 350 км. При частотах нагрева выше двойного резонанса примерно на $12~\rm k\Gamma$ ц генерировались компоненты BUM1 и BUM2 искусственного радиоизлучения ионосферы, а также широкополосное излучение в полосе отстроек от $-400~\rm до$ $+250~\rm \Gamma$ ц. Эффекты модификации ионосферы проявлялись для частот нагрева в диапазоне около четвёртой гармоники гирочастоты с шириной около $200~\rm k\Gamma$ ц, т. е. порядка 4% от резонансной частоты (подавление DM-компоненты, появление BUM-компонент и развитие параметрической распадной неустойчивости). По мере ослабления BUM-компоненты усиливалась DM-компонента, возрастали амплитуда искусственных ионосферных неоднородностей, температура электронов $T_{\rm e}$ и скорость выноса ионов $V_{\rm i}$. При этом амплитуда искусственных неоднородностей электронной концентрации и интенсивность DM-компоненты были выше по сравнению с их уровнями до двойного резонанса.

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. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1 145.
- 2. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // УФН. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
- 3. Leyser T. B. // Space Sci. Rev. 2001. V. 98. P. 223.
- 4. Благовещенская Н.Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. С.-Петербург: Гидрометеоиздат, 2001. 288 с.
- 5. Frolov V. L., Sergeev E. N., Ermakova E. N., et al. // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28, No. 16. P. 3 103.
- 6. Sergeev E. N., Frolov V. L., Grach S. M., Kotov P. V. // Adv. Space Res. 2006. V. 38. P. 2518.
- 7. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Kagan L. M., et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81, No. 8. P. 1630.
- 8. Frolov V. L., Ermakova E. N., Kagan L. M., et al. // J. Geophys. Res. A. 2000. V. 105, No. 9. P. 20919.
- 9. Carozzi T. D., Thide B., Grach S. M., et al. // J. Geophys. Res. A. 2002. V. 107, No. 9. P. 1253.
- 10. Фролов В. Л., Болотин И. А., Комраков Г. П. и др // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, N_2 6. С. 393.

- 11. Грач С. М., Сергеев Е. Н., Яшнов В. А., Котов П. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 7. С. 553.
- 12. Stubbe P., Kohl H., Rietveld M. T. // J. Geophys. Res. A. 1992. V. 79, No. 5. P. 6285.
- 13. Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Йоман Т. К., Ритвельд М. Т. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 9. С. 571.
- Blagoveshchenskaya N. F., Carlson H. C., Kornienko V. A., et al. // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 131.
- 15. Ashrafi M., Kosch M. J., Kaila K., Isham B. // J. Geophys. Res. A. 2007. V. 112. Art. no. A05314.
- Mishin E. V., Kosch M. J., Pedersen T. R., Burke W. J. // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32, No. 12. Art. no. L23106.
- 17. Sergeev E., Grach S., Shindin A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110, No. 6. Art. no. 065002.
- 18. Bernhardt P. A., Selcher C. A., Kowtha S. // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. Art. no. L19107.
- 19. Rietveld M. T., Kohl H., Kopka H., Stubbe P. // J. Atmos. Terr. Phys. 1993. V. 55. P. 577.
- 20. Rishbeth H., van Eyken T. // J. Atmos. Terr. Phys. 1993. V. 55. P. 525.
- 21. Lehtinen M. S., Huuskonen A. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58. P. 435.
- 22. Stubbe P. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58. P. 349.
- 23. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // J. Geophys. Res. A. 2003. V. 108, No. 4. P. 1141.
- 24. Kosch M. J., Pedersen T., Mishin E., et al. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. Art. no. A06325.
- 25. Greenwald R. A., Baker K. B., Dudeney J. R., et al. // Space Sci. Rev. 1995. V. 71. P. 761.
- 26. http://spaceweather.com.
- 27. http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp.
- 28. Wahlund J.-E., Opgenoorth H. J., Hagstrom I., et al. // J. Geophys. Res. A. 1992. V. 97. P. 3019.
- 29. Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Корниенко В. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 97.
- 30. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kornienko V. A., et al. // Ann. Geophys. 2005. V. 23. P 87
- 31. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kornienko V. A., et al. // Adv. Space Res. 2006. V. 38, No. 11. P. 2503.
- 32. DGRF/IGRF Geomagnetic Field Model 1900–2015 and Related Parameters. $http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/igrf \ vitmo.html\,.$
- 33. Mishin E., Hagfors T., Kofman W. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 27 265.
- 34. Грач С. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 7. С. 651.
- 35. Huang J., Kuo S. P. // J. Geophys. Res. A. 1994. V. 99, No. 10. P. 19569.

Поступила в редакцию 29 апреля 2013 г.; принята в печать 25 декабря 2013 г.

PHENOMENA IN THE HIGH-LATITUDE IONOSPHERIC F REGION INDUCED BY A HF HEATER WAVE AT FREQUENCIES NEAR THE FOURTH ELECTRON GYROHARMONIC

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

We present the results of multi-instrument studies of phenomena in the high-latitude ionospheric F region induced by high-power O-mode HF radio waves injected towards the magnetic zenith when the ratio of the heater frequency to the critical frequency of the F_2 layer is near the fourth electron gyroharmonic frequency. Based on the stimulated electromagnetic emission (SEE) spectral observations in the

kilohertz and hertz frequency bands of detunings relative to the heating wave frequency, the behaviors of different parameters of the ionospheric plasma and small-scale artificial field-aligned irregularities are compared and analyzed. The coexistence of the thermal (resonance) parametric instability (TPI) and parametric decay (striction) instability (PDI) was found in the vicinity of the forth gyroresonance harmonic.