

УДК 533.951 + 537.868

Эффекты модификации высокоширотной F-области ионосферы мощными КВ радиоволнами на частотах вблизи пятой и шестой гирогармоник электронов

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

⁽¹⁾ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 38, улица Беринга, г. Санкт-Петербург, 199397, Россия borisova@aari.ru

⁽²⁾ Европейская научная Ассоциация EISCAT, г. Тромсе, Норвегия

⁽³⁾ Лейстерский университет, г. Лейстер, Англия

⁽⁴⁾ Европейская научная Ассоциация EISCAT, г. Кируна, Швеция

РЕФЕРАТ

Исследованы эффекты модификации высокоширотной F-области ионосферы при воздействии мощной КВ радиоволны обыкновенной поляризации (нагревного стенда EISCAT/Heating), излучаемой в направлении магнитного зенита на частотах около пятой и шестой гирогармоник электронов ($f_H \approx 5f_{ce}$ и $6f_{ce}$). Анализ наблюдаемых явлений выполнен по данным измерений на EISCAT радаре некогерентного рассеяния (НР) радиоволн (930 МГц) в г. Тромсе, когерентном радаре CUTLASS в Финляндии, приемном комплексе для регистрации искусственного радиоизлучения ионосферы. Детально исследовано поведение параметров ионосферной плазмы (электронной концентрации N_e , температуры электронов T_e), спектров плазменных и ионных линий, мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и спектров искусственного радиоизлучения ионосферы. Выполнено сравнение эффектов, возникающих вблизи пятой и шестой гармоник гирорезонансов. Показано, что вблизи пятой и шестой гармоник гирорезонансов одновременно с тепловой параметрической (резонансной) неустойчивостью возбуждаются параметрическая распадная (стрикционная) и/или осциллирующая двухпотоковая неустойчивости. Возбуждение неустойчивостей происходит на высотах, близких высоте отражения волны накачки и верхней гибридной высоте.

Modification effects of the high-latitude ionospheric F region by powerful HF radio waves at frequencies in the vicinity of fifth and sixth electron gyroharmonics

Borisova T. D.⁽¹⁾, Blagoveshchenskaya N. F.⁽¹⁾, Kalishin A. S.⁽¹⁾,
Rietveld M.T.⁽²⁾, Yeoman T. K.⁽³⁾, Hågström I.⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Bering Str., St. Petersburg, 199397, Russia borisova@aari.ru

⁽²⁾ EISCAT Scientific Association, Tromsø, Norway  University of Lancaster , Lancaster, UK

⁽³⁾ University of Leicester, Leicester, UK

⁽⁴⁾ EISCAT Scientific Association, Kiruna, Sweden

We present the experimental results related to the studies of phenomena in the high latitude ionospheric F-region induced by powerful O-mode HF radio waves injected towards magnetic zenith, when the heater frequencies are near the fifth and sixth electron gyroharmonic frequency, $f_H \approx 5f_{ce}$ and $6f_{ce}$. Multi-instrument diagnostics, such as the EISCAT incoherent scatter radar (930 MHz) at Tromsø, the CUTLASS radar at Hankasalmi, Finland and SEE (stimulated electromagnetic emission) receiver have been used for the analysis of data obtained. The behaviors of the plasma parameters (the electron temperature and density), the ion and plasma line spectra, the small-scale artificial field-aligned irregularities, the SEE spectral components are analysed in detail. The comparison between the fifth and sixth gyroresonance signatures have been made from multi-instrument observations. The coexistence of the thermal (resonance) parametric instability (TPI) and parametric decay instability (PDI) and the oscillating two stream instability (OTSI) was found in the vicinity of fifth and sixth gyroresonances. The excitation of instabilities occurred at the altitude closed to the reflection height of HF pump wave and upper hybrid altitude both.

ВВЕДЕНИЕ

При воздействии мощного КВ радиоизлучения обыкновенной поляризации (О- поляризации) на ионосферную плазму возбуждается широкий комплекс явлений в областях резонансного взаимодействия мощной КВ радиоволны с ионосферной плазмой. При определенных условиях в ионосфере реализуется двойной резонанс. Двойной резонанс имеет место на ионосферной высоте, когда наблюдается равенство между частотой нагрева f_H , верхней гибридной частотой f_{UH} и частотой кратной гирочастоте электронов, $f_H = f_{UH} = nf_{ce}$, где

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

f_{plasm} – плазменная частота ионосферы и f_{ce} – гирочастота электронов на высоте верхнего гибридного резонанса h_{UH} [1 – 6]. Особенности, возникающим в ионосфере, модифицированной мощными КВ радиоволнами с частотами, близкими частотам двойных резонансов, посвящены многочисленные исследования [1 – 8 и цитируемая литература]. Явления, регистрируемые вблизи двойного резонанса, существенно зависят от номера гирогармоники n .

В настоящее время активно продолжаются исследования нелинейного взаимодействия мощной нагревной волны с ионосферной плазмой при приближении частоты волны накачки f_H к гармоникам гирочастоты электронов nf_{ce} . Например, в экспериментах на нагревном стенде HAARP при воздействии на ионосферу мощных радиоволн на частотах, близких к 4-й гармонике электронной циклотронной частоты f_{ce} , обнаружено и исследовано образование слоя искусственной ионизации, опускающегося на 5-30 км от уровня отражения волны накачки до высот локального двойного резонанса [9, 10]. На том же стенде, по наблюдениям искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) при нагреве на частотах возле третьей и четвертой гармоник электронной гирочастоты исследованы спектры ИРИ, возбуждаемые в диапазоне ионных акустических волн и около гармоник ионной гирочастоты [11]. На стенде Сура исследованы гирогармонические свойства генерации искусственных ионосферных неоднородностей различных масштабов, возбуждаемых при модификации области F2 ионосферы, когда частота волны накачки близка к четвертой гармонике гирочастоты электронов в области взаимодействия мощной короткой радиоволны обыкновенной поляризации с плазмой [5]. На стенде EISCAT выполнены исследования около третьей [12] и четвертой гармоник гирорезонансов [13]. В частности, в работе [13] представлены результаты исследований эффектов модификации высокоширотного слоя F2 ионосферы при воздействии мощной КВ радиоволны обыкновенной поляризации в окрестности четвертой гирогармоники электронов, $f_H \approx 4f_{ce}$ и показано, что одновременно могут возбуждаться как тепловая параметрическая (резонансная) TPI, так и параметрическая распадная (стрикционная) PDI неустойчивости.

В настоящей работе продолжено изучение особенностей поведения ионосферной плазмы в высокоширотном F2 слое ионосферы при ее нагреве мощными КВ радиоволнами О-поляризации в направлении магнитного поля Земли (КВ нагревной стенд EISCAT/Heating в г. Тромсе) на частотах в окрестностях пятой и шестой гармоник гирорезонансов электронов, $f_H \approx 5f_{ce}$ и $6f_{ce}$. Основной акцент сделан на анализе данных, полученных при использовании радара некогерентного рассеяния

радиоволн (НР) в Тромсе. Детально исследовано как поведение параметров ионосферной плазмы (температура и концентрация электронов), так и спектров плазменных и ионных линий. Отметим, что появление в спектрах радара НР инициированных нагревом плазменных HFPL (HF-induced plasma lines) и усиленных ионных HFIL (HF-enhanced ion lines) линий является прямым доказательством возбуждения параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости. Уделено внимание также сравнению эффектов, возникающих вблизи пятой и шестой гармоник гирорезонансов. При анализе данных радара НР использованы также результаты одновременных измерений спектров искусственного радиоизлучения ионосферы в килогерцовом диапазоне частот и мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей различных пространственных масштабов.

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования эффектов модификации высокоширотной ионосферы на частотах нагрева f_H в окрестностях пятой и шестой гармоник гирорезонансов электронов, $f_H \approx n f_{ce}$, где $n = 5$ и 6 , выполнены в октябре 2013 г. на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия). Излучение мощных КВ радиоволн О- поляризации проводилось в направлении магнитного зенита (наклон диаграммы направленности излучающей антенны составлял 12° к югу от вертикали, азимут – 185°). В экспериментах использовалась фазированная антенная решетка №1 (ширина диаграммы направленности $5 - 6^\circ$), обеспечивающая эффективную мощность излучения на частотах $6.7 - 8$ МГц порядка $P_{эфф} \sim 640$ МВт [14]. Излучение выполнялось циклами 20 мин нагрев/10 мин пауза, начиная с первой и тридцать первой минуты часа. В течение цикла нагрева каждые 20 с частота волны накачки f_H увеличивалась на 5 кГц, обеспечивая проход диапазона частот нагрева 295 кГц.

Диагностика явлений вблизи двойных резонансов проводилась с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц в Тромсе [15], КВ радара CUTLASS (SUPERDARN) в Финляндии, работавшего на частотах 13 МГц (только 22.10.13), 16, 18 и 20 МГц [16], комплекса для регистрации спектров искусственного радиоизлучения ионосферы в Тромсё, приемного многоканального КВ доплеровского комплекса для регистрации диагностических КВ радиосигналов методом ракурсного рассеяния [4], установленного на обсерватории ААНИИ «Горьковская» под г. С. Петербург, и ионозонда вертикального зондирования ВЗ 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 [13].

В Таблице 1 представлена обобщенная характеристика экспериментов, выполненных в октябре 2013 г. около пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов. Табл. 1 включает даты проведения экспериментов, время начала каждого 20-минутного цикла нагрева, диапазон изменения частот в цикле нагрева, номер гармоники гирорезонанса n , значения критической частоты слоя F2 $foF2$ непосредственно перед циклом нагрева. Дополнительно в табл. 1 показан ряд параметров, определенных в процессе обработки и анализа данных: время наблюдения эффектов на гармониках гирорезонансов по данным искусственного радиоизлучения ионосферы t_R , частота нагрева в момент t_R ,

f_{HR} , высоты возникновения гирорезонансов $h_{HR_модель}$, рассчитанные по модели высотного распределения гирочастоты электронов $f_{ce}(h)$ [17] и h_{R_HFIL} , определяемые по высоте возбуждения усиленных нагревом ионных линий HFIL из данных радара HP.

В октябре 2013 г. наблюдалась высокая солнечная активность. Ежедневные числа Вольфа W , характеризующие солнечную активность, изменялись от 148 до 228 [18]. Данные W указаны в табл.1 вместе с датой. Магнитная активность в дни проведения экспериментов была низкой. Значения трехчасового планетарного индекса K_p [19] находились около 0 (сумма K_p за сутки $\Sigma K_p \sim 3$), за исключением 22.10.2013, когда $K_p \sim 2$ ($\Sigma K_p \sim 9$). По данным измерений ионозонда ВЗ ионосферы в Тромсе в периоды экспериментов критические частоты слоя F2 (f_oF2) 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 повышение минимальных частот отражений от слоя F2 от 2 до 4 МГц.

На рис. 1 приведены временные изменения критических частот слоя F2 f_oF2 для дней проведения экспериментов в октябре 2013 г., указанных в табл.1. Можно видеть, что перед началом нагревных циклов в подавляющем большинстве случаев частота излучения комплексе EISCAT/Heating f_H была ниже f_oF2 , $f_H < f_oF2$.

В октябре 2013 г. регистрация искусственного радиоизлучения ионосферы ИРИ осуществлялась в килогерцовом диапазоне частот отстроек относительно частоты нагрева f_H от -50 кГц до $+150$ кГц на аппаратуре комплекса EISCAT/Heating. Данные измерений позволяли регистрировать такие спектральные компоненты ИРИ как DM (максимум, сдвинутый в область отрицательных отстроек от частоты нагрева – downshifted maximum) и BUM (широкий, сдвинутый в область положительных отстроек максимум – broad upshifted maximum). Время возникновения двойных резонансов на пятой и шестой гармониках гирочастоты электронов t_R и соответствующее значение частоты нагрева f_{HR} , представленные в табл.1, определяли по максимальному подавлению интенсивности DM компоненты в спектре ИРИ.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

2.1. Данные радара некогерентного рассеяния радиоволн в октябре 2013 г.

В период проведения нагревных экспериментов радар HP 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 КВ радиоволны). Отметим, что высоты, определяемые по данным радара HP, приведены вдоль линии наблюдения, $h = h_{Radar} = h_{vert}/\cos(12^\circ)$. Первичные (raw) данные измерений радара были обработаны с помощью унифицированного комплекса программ GUISDAP [20] для вычислений параметров ионосферной плазмы (электронной плотности N_e , температуры электронов T_e). Распределения N_e и T_e

от времени t и высоты h , $N_e(t,h)$ и $T_e(t,h)$, определялись с шагом интегрирования по времени 20 с (интервал изменения частоты нагрева f_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) и высокочастотном (моды Ленгмюра) диапазонах. Для максвелловской плазмы, или плазмы в тепловом равновесии, спектр радара НР в низкочастотной области, как правило, имеет форму с двумя максимумами, смещенными относительно 0 в отрицательную “–” и положительную “+” области, что соответствует ионно-акустическим волнам, направленным “от” и “к” радару (в англ. литературе down- и up-shifted ion lines). Величина доплеровского смещения максимумов относительно 0 зависит от частоты излучения радара и для радара НР в г.Тромсе, работающего на частоте 930 МГц, на высотах F-области ионосферы составляет порядка ± 10 кГц (без учета затухания Ландау). Спектр радара НР в Тромсе в высокочастотной области представлен измерениями плазменных волн, направленных только «от» радара (downshifted). В нагревных экспериментах спектры радара НР позволяют регистрировать усиленные нагревом ионные линии (HF-enhanced ion lines, HFIL) и инициированные нагревом плазменные линии (HF-induced plasma lines, HFPL). Как известно [21, 22, 23, 24], возбуждение HFIL и HFPL является прямым указанием на развитие параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости (parametric decay instability, PDI) на высотах вблизи отражения мощной КВ радиоволны от ионосферы. На основе дополнительных возможностей GUISDAP по первичным данным радара проведены расчеты спектральной мощности S рассеянных сигналов в высокочастотном и низкочастотном диапазонах для исследования особенностей поведений инициированных нагревом плазменных линий HFPL – S_{PL} и усиленных нагревом ионных линий HFIL – S_{IL} . Графическое представление результатов интегрирования выполнено в средах MatLab или GUISDAP. При анализе использовались только данные, достоверность которых подтверждалась параметром Residual <2 [20]. Достоверные значения S_{PL} и S_{IL} рассчитаны с постоянным шагом по высоте 3 км и времени 20 или 40 с.

2.1.1 Результаты наблюдений радаром НР вблизи пятой гармоники гирорезонанса

Из табл.1 можно видеть, что модификация высокоширотной ионосферы 22, 23, 25 и 26 октября 2013 г. на частотах накачки $f_H \sim 5f_{ce}$, происходила в условиях отражения мощной КВ радиоволны обыкновенной поляризации от ионосферного слоя F2, $f_H < f_oF2$. В 20-ти мин цикле нагрева f_H изменялась в диапазоне от 6.700 до 6.995 МГц или 6.600 до 6.895 МГц, увеличиваясь на 0.005 МГц каждые 20 с.

В качестве типичного примера результатов измерений радаром НР для экспериментов $f_H \sim 5f_{ce}$, на рис.2 показаны высотно-временные распределения электронной плотности N_e (рис.2а) и температуры электронов T_e (рис.2б), полученные 25 октября 2013 г. с 14:00 до 15:25 UT в диапазоне высот от 130 до 550 км. На рис. 2в приведены высотно-временные распределения первичных (raw)

значений плотности электронов N_{e_raw} (мощности рассеянных сигналов) с разрешением по высоте порядка 1.5 км.

Для определения моментов двойных резонансов при изменении f_H использовались результаты одновременных измерений спектров ИРИ. Рис.2г демонстрирует спектрограммы ИРИ в анализируемый период времени 14:00 – 15:25 UT 25.10.13. Данные по ИРИ регистрировались в основном с шагом по времени 9 – 12 с, кроме интервала времени 14:02 – 14:08 UT 25 октября, когда измерения выполнены с более редким шагом (1.5 – 2 мин). Спектрограммы ИРИ представлены в диапазоне частот отстроек ($-40 \div +120$) кГц относительно частоты накачки f_H . На рис.2г в цикле нагрева с 14:31 до 14:51 UT отмечены DM и BUM спектральные компоненты ИРИ, на поведение которых влияет соотношение между f_H , f_{UH} и nf_{ce} [1, 2, 3]. При нагреве на частоте $f_H = f_{HR} \approx f_{UH} \approx nf_{ce}$ интенсивность DM компоненты подавляется и начинает формироваться BUM компонента спектра ИРИ. Частота f_{HR} принята за частоту двойного резонанса на пятой (или шестой) гармонике гирочастоты электронов. Введем обозначения для частоты накачки f_H , на которой наблюдался максимум интенсивности DM компоненты f_{HDMmax} , для условий нагрева на частотах, ниже двойного резонанса, $f_H < f_{HR}$, и $f_{HBUMmax}$ – для частоты накачки, на которой регистрировался максимум интенсивности BUM компоненты при нагреве на частотах $f_H > f_{HR}$. Отметим, что на частотах, выше двойного резонанса, когда интенсивность BUM компоненты достигала максимальных значений ($f_H > f_{HR}$ и $f_H \sim f_{HBUMmax}$) наблюдался рост интенсивности DM компоненты.

Рис.2а демонстрирует резкое возрастание электронной концентрации N_e на $\sim 50\%$ (по сравнению с уровнем в течение первых минут цикла нагрева) в широком диапазоне высот, выше высоты отражения мощной КВ радиоволны $h_{отрО}$ и максимума слоя F2 ($h_mF2 \sim 270$ км), вплоть до высот порядка 550 км. В трех нагревных циклах 25.10.13 указанные возрастания N_e начинались около 14:09, 14:38 и 15:07 UT на фоне спада интенсивности DM компоненты на частотах излучения ниже двойного резонанса $f_H < f_{HR}$ и $f_H \sim f_{HDMmax} + 5 \div 15$ кГц и продолжались до конца нагревного цикла. Отметим, что возрастания N_e в более узком диапазоне высот около высоты отражения мощной КВ радиоволны ранее также наблюдались в экспериментах на нагревном комплексе EISCAT/Heating в Тромсе, когда f_H была близка к третьей и четвертой гирогармоникам электронов и критическим частотам слоя F2 [12, 13, 25].

Из рис. 2б следует, что при нагреве на частотах $f_H \sim f_{HR} \sim 5f_{ce}$ наблюдалось значимое уменьшение температуры электронов T_e на 1500 – 2500 К в интервале высот 50 – 70 км как ниже, так и выше максимума слоя F2 ионосферы. Спад T_e начинался на частотах $f_H < f_{HR}$ и $f_H \sim f_{HDMmax} + 15 \div 25$ кГц. Подавление T_e продолжалось в диапазоне изменения $f_H \in (f_{HDMmax} + 15 \div 25; f_{HR} + 45 \div 75)$, который составлял 60 – 100 кГц, что соответствует 4-6 мин нагревного цикла. Верхняя граница f_H подавления T_e выше пятой гармонике гирорезонанса $f_H > f_{HR}$ соответствует частотам $f_H \sim f_{HBUMmax}$, при которых наблюдался максимум интенсивности BUM компоненты и возрастание интенсивности DM компоненты. Минимальные T_e регистрировались на частотах накачки близких двойному резонансу $f_H \sim f_{HR}$. На частотах, выше области подавления T_e , $f_H > f_{HR} + (90 \div 120)$ кГц, наблюдаемые максимальные

значения $T_{e \max}$ были на 1000 – 1500 К ниже, чем $T_{e \max}$ для условий $f_H < f_{HR}$. На фоне спада T_e для частот накачки $f_H \sim f_{HR} + 20 \div 50$ кГц на высотах вблизи h_{UH} наблюдались локальные кратковременные возрастания T_e на 1500 – 2000 К. Отсутствие данных о T_e на рис.2б (белые пятна) на высотах слоя F2 в представленных измерениях подтверждают наличие сильных неустойчивостей в ионосфере, когда сигналы радара становятся недостоверными и $Residual \geq 2$.

Анализ $N_{raw}(t,h)$ (рис. 2в) показывает, что при включении нагревного комплекса наблюдались кратковременные всплески HFIL, что является типичным проявлением распадной (стрикционной) неустойчивости PDI по данным радара HP в нагревных экспериментах и не связано с эффектами вблизи гармоник гирорезонансов [22]. Интенсивные усиленные нагревом ионные линии в спектрах радара HP (HFIL) в октябре 2013 г. на частотах накачки $f_H \sim 5f_{ce}$ регистрировались на протяжении всех циклов нагрева. Мощности HFIL, S_{IL} , превышали на 1 – 2 порядка фоновые измерения S_{IL} в паузах. При нагреве на частотах $f_H < f_{HR}$ значения спектральных мощностей S_{IL} были выше, чем на частотах $f_H > f_{HR}$. Наибольшие мощности S_{IL} наблюдались на частотах $f_H < f_{HR}$ и $f_H \sim f_{HDMmax}$. Высота возбуждения HFIL, h_{HFIL} , в цикле нагрева постепенно снижалась на 10 – 12 км от начального уровня h_{HFIL} в моменты включения по мере сканирования частоты f_H до $\sim f_{HR} + (75 \div 90)$ кГц. Последующий рост h_{HFIL} начинался на частотах накачки $f_H \sim f_{HBUMmax}$, и продолжался одновременно с понижением интенсивности BUM компоненты, нарастанием интенсивности DM компоненты и T_e . К концу нагревного цикла высота h_{HFIL} увеличивалась на 4 – 8 км относительно минимального уровня снижения. По высотному диапазону HFIL занимали область ± 6 км от высоты с наибольшей мощностью ионных линий S_{IL} . На фоне роста высоты h_{HFIL} после исчезновения BUM компоненты ($f_H > f_{HR}$) можно видеть расширение диапазона высот возбуждений HFIL.

Из рис.2а, 2б и 2в следует, что снижение высоты возбуждения ионных линий h_{HFIL} сопровождалось увеличением электронной плотности N_e на высотах слоя F2. Минимальные h_{HFIL} регистрировались одновременно с максимальными значениями интенсивности компоненты BUM ИРИ. Максимальные понижения высоты трека HFIL достигали 8 – 12 км, что соответствует изменению гирочастоты электронов $f_{ce}(h)$ примерно на 6-7 кГц и сопоставимо с величиной нижней гибридной частоты ионосферы.

На рис. 3 в качестве примера приведены результаты спектральной обработки в низкочастотном диапазоне данных радара HP для 25 октября 2013г в цикле нагрева 14:01 – 14:21 UT. На верхних панелях t1 – t3 для трех моментов времени показаны спектры ионно-акустических линий на различных высотах в интервале частот ± 20 кГц. Моменты времени t1, t2 и t3 выбраны соответственно для условий наблюдений: t1 – максимальной интенсивности DM компоненты ИРИ при $f_H < f_{HR}$ и $f_H \sim f_{HDMmax}$, t2 – максимального подавления DM компоненты на частотах $f_H \sim f_{HR}$ и t3 – максимальной интенсивности BUM компоненты для $f_H > f_{HR}$ и $f_H \sim f_{HBUMmax}$. Спектры мощности HFIL в нагревных экспериментах, как правило, представляют собой двугорбые кривые с максимумами, смещенными относительно нулевой частоты в положительную область с мощностью S_{ILU} , и в отрицательную – S_{ILD} стороны, а иногда с несмещенным относительно нуля максимумом S_{IL0} . Отметим, что высоты,

приведенные на рис.3 в середине колонок $t_1 - t_3$ соответствуют высотам отражений нагревной волны и высотам верхнего гибридного резонанса (на частотах излучения волны накачки около 7 МГц высоты отражения $h_{отрО}$ и верхнего гибридного резонанса $h_{УН}$ в ионосфере близки при учете наклона диаграммы направленности антенной решетки на 12°). Фоновые значения S_{IL} в паузах между циклами нагрева составляли 50 – 80 отн. ед. Из приведенных спектров можно видеть, что кроме максимумов S_{ILU} и S_{ILD} регистрировался несмещенный относительно нуля максимум S_{ILO} . Значения мощностей S_{ILO} вблизи двойного резонанса превышали мощности боковых максимумов S_{ILU} и S_{ILD} на высотах выше $h_{отрО}$ (t_2 , $h=211$ км). На трех нижних панелях рис.3 а–в приведены вариации от времени мощностей S_{ILD} , S_{ILO} 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. Приведены вариации спектральных мощностей $S_{IL}(t)$ для четырех ионосферных высот, так как высотное расположение HFIL (рис.2в) менялось во времени. С началом цикла нагрева по мере увеличения частоты накачки до $f_H \sim f_{HDMmax}$ наблюдался уровень мощности S_{HFIL} на 1.5 – 2 порядка выше фоновых значений мощностей ионных линий. Максимальное усиление S_{ILD} , S_{ILO} и S_{ILU} на 2 – 2.5 порядка (по сравнению с фоном) проявлялось на частотах $f_H < f_{HR}$, одновременно с максимумом интенсивности DM компоненты ИРИ $f_H \sim f_{HDMmax}$, при возрастании $f_H > f_{HDMmax}$ начиналось снижение мощностей S_{IL} для всех трех максимумов. В области $f_H \sim f_{HR}$ можно отметить относительное локальное возрастание S_{ILO} . На частотах $f_H \sim f_{HNUMmax}$ формировался спад S_{ILU} , S_{ILD} и S_{ILO} , который продолжается до конца цикла. В конце нагревного цикла на частотах накачки, превышающих f_{HR} на $145 \div 155$ кГц, устанавливались мощности S_{IL} сопоставимые с фоновыми значениями.

Результаты анализа спектров радара некогерентного рассеяния в высокочастотном диапазоне показали возбуждение инициированных нагревом плазменных линий (HFPL) в широком диапазоне изменений частот накачки f_H около пятой гармонике гирочастоты электронов.

На рис. 4а показана спектрограмма частот излучений инициированных нагревом плазменных линий $f_{HFPL}(t)$, измеренная 25 октября 2013г. с 14:01 до 15:21 UT в диапазоне высот 128 – 302 км. Вид $f_{HFPL}(t)$ на рис.4а является типичным для всех экспериментов вблизи пятой гармонике гирорезонанса, выполненных в октябре 2013 г. Характерной особенностью в поведении инициированных нагревом плазменных линий для $f_H \sim 5f_{ce}$ явилось наличие на спектрограммах двух треков HFPL: HFPL₁ и HFPL₂. Плазменные линии HFPL₁, возбуждались на частотах, близких к значениям частот накачки f_H , и наблюдались в диапазоне изменений $f_H \in [f_{HR} - 100 \text{ кГц}; f_{HR} + 30 \text{ кГц}]$. Плазменные линии HFPL₂ регистрировались на частотах, превышающих частоты накачки f_H на 150 – 250 кГц, в диапазоне изменения f_H относительно f_{HR} , $f_H \in [f_{HR} - 100; f_{HR} + 10] \text{ кГц}$. В моменты включений передатчика мощных КВ радиоволн регистрировались отклики как для HFPL₁, так и для HFPL₂. Для дискретного набора высот на рис.4б и 4в приведены вариации во времени мощностей HFPL₁ и HFPL₂ (S_{PL1} и S_{PL2}) соответственно. После возбуждений HFPL₁ и HFPL₂ наблюдался рост мощностей S_{PL1} и S_{PL2} . При увеличении f_H в нагревном цикле на 5 кГц каждые 20 с до значений $f_H \sim f_{HDMmax}$ мощности S_{PL1} и S_{PL2} сопоставимы по уровню, а в некоторые моменты времени даже $S_{PL2} > S_{PL1}$. На частотах накачки $f_H >$

f_{HDMmax} значения S_{PL1} резко увеличивались на порядок, а мощности S_{PL2} начинали уменьшаться. Наиболее высокие значения S_{PL2} наблюдались на частотах $f_{\text{H}} < f_{\text{HR}}$ одновременно с повышенной интенсивностью DM компоненты в спектре ИРИ. На частотах накачки выше двойного резонанса $f_{\text{H}} > f_{\text{HR}}$ ($n=5$) амплитуды S_{PL1} и S_{PL2} резко уменьшались и при $f_{\text{H}} \sim f_{\text{HBMmax}}$ – исчезали. На рис.4г и 4д показаны высотно-временные распределения $S_{\text{PL1}}(t,h)$ и $S_{\text{PL2}}(t,h)$ соответственно. Высоты возбуждений HFPL₁ и HFPL₂ соотносятся с высотами формирования HFIL с допуском ± 3 км.

2.1.2 Результаты наблюдений радаром НР вблизи шестой гармоники гирочастоты электронов

Ионосферные условия 22, 27, 28 и 29 октября 2013 г. над нагревным комплексом EISCAT/Heating позволили провести эксперименты по модификации высокоширотной ионосферы на частотах около шестой гармоники гирорезонанса, $f_{\text{H}} \sim 6f_{\text{ce}}$. Частоты нагрева f_{H} обыкновенной поляризации мощного КВ передатчика стенда излучались в диапазоне 7.950 – 8.245 МГц или 8.000 – 8.300 МГц в направлении магнитного зенита (табл.1). Эксперименты проводились в основном с 14 до 15 UT, за исключением 22 октября (с 12 до 14:30 UT). Быстрое уменьшение критических частот f_oF2 ионосферного слоя F2 в периоды наблюдений приводило к тому, что в первом цикле накачки 14:01 – 14:21 UT выполнялись условия $f_{\text{H}} < f_oF2$. В цикле с 14:31 до 14:51 нагрев проводился на частотах f_{H} , близких критическим частотам $f_{\text{H}} \sim f_oF2$.

На рис.5 в качестве характерного примера результатов измерений радаром НР в экспериментах по модификации ионосферы на частотах накачки $f_{\text{H}} \sim 6f_{\text{ce}}$, показаны высотно-временные распределения электронной плотности N_e (а) и температуры электронов T_e (б) в диапазоне высот от 150 до 450 км для интервала времени 14:00 – 15:00 UT 29 октября 2013 г. Расчеты выполнены с шагом интегрирования по времени 20 с в пакете MatLab. Отметим, что 29.10.2013 в цикле 14:01 до 14:21 UT мощная КВ радиоволна отражалась от ионосферного слоя F2, $f_{\text{H}} < f_oF2$. В середине следующего цикла 14:31 – 14:51 UT f_oF2 резко уменьшились, и нагрев проводился вблизи критической частоты $f_{\text{H}} \sim f_oF2$. На рис.5г приведены спектрограммы интенсивности ИРИ в полосе частот отстроек от f_{H} [–50 кГц; +100 кГц] для двух циклов нагрева 29.10.2013г (обозначения аналогичны рис.2г).

Как следует из рис. 5а, в цикле 14:01 – 14:21 UT ($f_{\text{H}} < f_oF2$), с 14:11 UT наблюдалось возрастание электронной концентрации N_e на ~ 40 % (по сравнению с уровнем N_e в первые 10 минут нагревного цикла). Оно происходило в широком диапазоне высот от уровня отражения мощной КВ радиоволны до 450 км. Значимое увеличение N_e в широком диапазоне высот зарегистрировано также с 14:37 UT, при нагреве в следующем цикле 14:31 – 14:51 UT ($f_{\text{H}} \sim f_oF2$). В условиях нагрева $f_{\text{H}} < f_oF2$ вблизи шестой гармоники гирорезонанса ($f_{\text{H}} \sim 6f_{\text{ce}}$) возрастания N_e начинались на частотах накачки ниже частоты двойного резонанса $f_{\text{H}} < f_{\text{HR}}$, когда $f_{\text{H}} \sim f_{\text{HDMmax}} + 5 \div 10$ кГц, аналогично тому, как это имело место для экспериментов около пятой гармоники гирорезонанса. Одновременно с увеличением N_e наблюдался спад интенсивности DM компоненты ИРИ. На частотах f_{H} выше двойного резонанса $f_{\text{H}} \geq f_{\text{HR}} + (45 \div 60)$ кГц уровень N_e на высотах слоя F2 начинал плавно снижаться и в конце цикла приближался к значениям первых минут цикла нагрева. Отметим, что в области частот $f_{\text{H}} \sim f_{\text{HR}} + (45 \div$

60) $kГц = f_{H_{BUMmax}}$ наблюдалась максимальная интенсивность BUM компоненты ИРИ. Во втором цикле ($f_H \sim f_oF2$) резкое возрастание N_e происходило в более узком диапазоне высот по сравнению с первым циклом, при этом повышенный уровень N_e на высотах слоя F2 регистрировался до конца цикла.

На рис. 5б с началом нагревных циклов можно видеть возрастание температуры электронов T_e на высотах F2 слоя ионосферы. В цикле 14:31 – 14:51 UT, когда $f_H \sim f_oF2$, возрастания T_e имели место в более широком диапазоне высот по сравнению с первым циклом. В целом, поведение T_e вблизи шестой гармоники гирорезонанса аналогично изменениям T_e около пятой гармоники.

На рис. 5в приведено высотно-временное распределение «сырой» (raw) плотности электронов N_{raw} (мощности рассеянных сигналов) с 14 до 15 UT в диапазоне высот от 170 км до 270 км и с разрешением 1.5 км. Из рис.5в следует, что усиленные нагревом ионные линии HFIL регистрировались не только при включении нагревного комплекса, но и в течение циклов нагрева. На протяжении цикла 14:01 – 14:21 UT ($f_H < f_oF2$) высота расположения HFIL h_{HFIL} увеличилась на 10 км от начального уровня, с небольшим локальным понижением на 3 – 4 км на частотах накачки f_H около f_{HR} . На частотах $f_H \sim f_{HR}$ наблюдается уменьшение мощности HFIL и рост концентрации N_e (рис.5а). Во втором цикле, пока выполнялось условие $f_H \leq f_oF2$, отмечался рост h_{HFIL} при увеличении частоты нагрева до $f_H \leq f_{HR} + (5 \div 10)$ кГц, сопровождавшийся нарастанием интенсивности ионных линий S_{IL} . С 14:40 UT на частотах $f_H > f_{HR}$ и $f_H \sim f_oF2$, пока регистрировалась BUM компонента в спектре ИРИ, наблюдалось понижение h_{HFIL} на 10 км, что ниже h_{HFIL} в начале цикла. В конце цикла при исчезновении BUM высота h_{HFIL} возросла до 250 км.

Результаты спектральной обработки данных радара HP в диапазоне ионно-акустических частот около шестой гармоники гирорезонанса показаны на рис.6. На верхних панелях (четыре столбца) приведены спектры ионных линий на различных высотах для четырех моментов времени $t1 - t4$. Моменты времени $t1, t2, t3$ относятся к циклу 14:01 – 14:21 UT ($f_H < f_oF2$), и $t4$ – пример спектров для цикла 14:31 – 14:51 UT, в котором $f_H \sim f_oF2$. Выбранные моменты времени характеризуются следующими особенностями: $t1$ – максимальная интенсивность DM компоненты ИРИ перед двойным резонансом, $f_H \sim f_{HDMmax}$, $t2$ и $t4$ – моменты двойных резонансов, $f_H \sim f_{HR}$, и $t3$ – максимум интенсивности BUM компоненты, $f_H \sim f_{H_{BUMmax}}$. Из приведенных спектров S_{IL} можно видеть, что для условий $f_H < f_oF2$ и $f_H \geq f_{HR}$ кроме смещенных вверх S_{ILU} и вниз S_{ILD} максимумов ионных линий регистрировался несмещенный относительно нуля максимум S_{IL0} . Особенностью наблюдений HFIL для условий $f_H \sim f_{H_{BUMmax}}$ ($f_H < f_oF2$) является превышение мощности несмещенного максимума S_{IL0} над боковыми максимумами ионных линий ($S_{IL0} > S_{ILU}$ и $S_{IL0} > S_{ILD}$), сопровождаемое нарастанием интенсивности DM компоненты для условий выше двойного резонанса $f_H > f_{HR}$. На трех нижних панелях рис.6 а-в показаны вариации во времени мощностей максимумов S_{IL0}, S_{ILU} и S_{ILD} для шести ионосферных высот. Усиление мощностей ионных линий S_{ILU} и S_{ILD} на один порядок (по сравнению с фоновыми значениями) наблюдалось на частотах $f_H < f_{HR}$ и $f_H \sim f_{HDMmax}$. В условиях нагрева на частотах ниже критической частоты ($f_H < f_oF2$) оно наблюдалось на высотах 219 – 222, а при нагреве

вблизи критической частоты ($f_H \sim f_oF2$) - на высотах 234 – 237 км. В моменты двойных резонансов $f_H \sim f_{HR}$ (t_2 и t_4) амплитуды S_{ILU} и S_{ILD} начинают снижаться. На частотах $f_H > f_{HR}$ при условии $f_H < f_oF2$ S_{ILU} и S_{ILD} продолжают уменьшаться в цикле нагрева до фоновых уровней. Однако мощности S_{ILO} (при $f_H < f_oF2$ и $f_H > f_{HR}$) увеличиваются в областях высот отражений. Отметим, что при нагреве вблизи критической частоты регистрируемые мощности максимумов S_{ILU} и S_{ILD} в 2 – 5 раз выше, чем в условиях $f_H < f_oF2$.

Анализ спектров радара НР в высокочастотном диапазоне при нагреве вблизи шестой гармоники гирорезонанса, $f_H \sim 6f_{ce}$, аналогично результатам вблизи пятой гармоники $f_H \sim 5f_{ce}$, обнаружил наличие инициированных нагревом плазменных линий (HFPL) в широком диапазоне изменений частот нагрева 260 – 295 кГц. На рис.7 показаны результаты спектральной обработки данных за 29 октября 2013 г. с 14:00 до 14:55 UT, которые являются типичными для экспериментов в октябре 2013 г. вблизи шестой гармоники гирорезонанса. Рис.7а демонстрирует спектрограмму частоты излучений инициированных нагревом плазменных линий $f_{HFPL}(t)$, измеренную в диапазоне высот 209 – 383 км. При регистрации HFPL значения частот возбуждений инициированных нагревом плазменных линий f_{HFPL} были близки значениям частот накачки стенда EISCAT/Heating. На рис.7б приведены вариации во времени мощности HFPL, $S_{PL}(t)$, для дискретного набора высот. Высотное-временное распределение $S_{PL}(t, h)$ показано на рис.7в. Мощности S_{PL} при модификации ионосферы с $f_H \sim f_oF2$ (цикл 14:31 – 14:51 UT) были в 2 – 6 раз выше, чем при нагреве ионосферы на частотах ниже f_oF2 (цикл 14:01 - 14:21 UT). Максимальные мощности плазменных линий S_{PL} наблюдались в области частот нагрева $f_H \sim f_{HDMmax}$. Уменьшение S_{PL} начиналось на частотах волны накачки выше двойного резонанса и максимальной интенсивности компоненты ИРИ BUM $f_H \geq f_{HBUMmax}$. Спад S_{PL} происходил существенно быстрее при условии нагрева на частотах $f_H < f_oF2$, по сравнению с нагревом вблизи f_oF2 . Высоты возбуждения HFPL близки к высотам расположения HFIL и изменялись в циклах нагрева аналогично h_{HFIL} ,

2.2. Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности

Одним из признаков возбуждения двойных резонансов в нагревных экспериментах является подавление интенсивностей мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН). В данном разделе приведены результаты наблюдений за поведением МИИН в нагревных экспериментах октября 2013г. на частотах f_H около пятой и шестой гармоник гирорезонансов. Измерения выполнены с использованием когерентного КВ радара CUTLASS (Ханкасалми, Финляндия) и методом ракурсного рассеяния на сети диагностических радиотрасс с помощью многоканального КВ доплеровского комплекса на НИС «Горьковская» под г. С. Петербургом (см. карту на рис.1 [13]).

На рис. 8 представлены результаты наблюдений 25 и 29 октября 2013 г. КВ радаром CUTLASS. Эксперименты проведены 25 октября с 14 до 15:30 UT при модификации ионосферы на частотах накачки $f_H \sim 5f_{ce}$ (рис.8а, а1-а3), и 29 октября - с 14 до 15:00 UT на частотах накачки $f_H \sim 6f_{ce}$ (рис.8б,

б1-б3). В период экспериментов в октябре 2013г. радар CUTLASS работал на трех частотах около 16, 18 и 20 МГц, что обеспечивало получение информации о поведении МИИН с поперечными к магнитному полю размерами ($l_{\perp} \approx 9, 8$ и 7.5 м). Регистрация рассеянных на МИИН сигналов проводилась в нестандартном режиме на один фиксированный луч (луч 5), ориентированный в направлении г.Тромсе с высокими временным (3 с) и пространственным (15 км) разрешениями. Первые «ворота» по дальности соответствовали 480 км. Дальность до центра искусственно возмущенной области ионосферы над Тромсё соответствует 31 «воротам». На панелях а и б приведены зависимости от времени мощностей рассеянных сигналов в искусственно возмущенной области ионосферы на трех частотах для 25 и 29 октября соответственно. Панели а1-а3 и б1-б3 иллюстрируют вариации мощностей рассеянных сигналов в координатах дальность (Range gate) – мировое время UT на различных частотах. Из рис.8 видно, что в период экспериментов регистрировались интенсивные обратно- рассеянные на МИИН сигналы. Время возникновения двойных резонансов при сканировании частоты накачки, полученное по данным измерений спектров ИРИ (табл.1), показано на оси времени рис. 8а и 8б. Анализ мощностей рассеянных на МИИН сигналов $P_{\text{МИИН}}$ по данным измерений радаром CUTLASS показал, что для экспериментов около пятой гармоники гирорезонанса подавление $P_{\text{МИИН}}$ на частотах накачки $f_H \sim f_{\text{HR}}$ составило $-2 \div -5$ дБ. При этом для гирорезонанса на шестой гармонике подавление $P_{\text{МИИН}}$ практически отсутствовало. Для пятой гармоники гирорезонанса на частотах $f_H > f_{\text{HR}}$ наблюдалось увеличение $P_{\text{МИИН}}$ на $5 - 10$ дБ. В целом для экспериментов около пятой гармоники наиболее интенсивное подавление $P_{\text{МИИН}}$ в двойном резонансе и наибольшие возрастание мощности рассеянных на МИИН сигналов на частотах выше двойного резонанса отмечалось в поведении более крупномасштабных МИИН ($l_{\perp} \approx 9$). МИИН с поперечными масштабами $l_{\perp} \approx 7.5$ м подавлялись в меньшей степени. Аналогичное поведение МИИН отмечалось и на третьей гармонике гирочастоты электронов [26], когда МИИН с масштабами $l_{\perp} < 10$ м испытывали более слабое подавление по сравнению с неоднородностями более крупных масштабов с $l_{\perp} \approx 12 - 15$ м.

На рис.9 в качестве примера представлены результаты измерений методом ракурсного рассеяния 25 октября 2013 г. с 14:00 до 15:00 UT на трассе Новосибирск – Тромсё – С.-Петербург. Измерения проведены на НИС «Горьковская» (под г. С.-Петербург) на диагностической частоте $f_{\text{диагн}} = 15670$ кГц. На рис.9 показаны динамические доплеровские спектры радиосигнала $f_{\text{диагн}} = 15670$ кГц (а) и временные вариации относительной спектральной мощности рассеянных сигналов (б). Распространению «прямого» сигнала из Новосибирска в С.-Петербург соответствует нулевая доплеровская частота. Расстояние между Новосибирском и Тромсё 3500 км и угол падения диагностического сигнала на возмущенную область составляет $70 - 80^\circ$, т.е. рассеяние в основном происходило на неоднородностях с поперечными масштабами $l_{\perp} \sim 10$ м. Отметим, что 25.10.2013 в 10-ю и 40-ю минуты каждого часа (в моменты близкие к двойным резонансам) включались сторонние регулярные помехи (рис.9а), не позволяющие определить малую величину ослабления мощности диагностических сигналов, рассеянных на искусственных неоднородностях.

В измерениях динамических доплеровских спектров радиосигнала (рис.9а) ясно наблюдается не только усиление мощности рассеянного КВ радиосигнала, но и уширение доплеровского спектра рассеянного сигнала при нагреве выше пятой гармоники гирорезонанса. Подобное явление отмечалось ранее в экспериментах вблизи четвертой гирогармоники [5, 27].

Из данных, представленных на рис. 8 и 9, можно видеть, что вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов МИИН с поперечными масштабами $l_{\perp} \sim 7.5 - 9$ м подавляются в двойном резонансе слабо, $-2 \div -5$ дБ. На шестой гармонике гирорезонансов подавление МИИН с теми же пространственными масштабами практически не происходит.

3. ОБОБЩЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования, выполненные в октябре 2013 г., позволили провести анализ эффектов модификации высокоширотной F-области ионосферы при ее нагреве мощными КВ радиоволнами O-поляризации вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов (табл.1) по данным различных средств и методов диагностики ионосферной плазмы. Основное внимание уделено результатам исследований с помощью радара некогерентного рассеяния в Тромсе (930 МГц), пространственно совмещенного с КВ нагревным комплексом EISCAT/Heating. Данные радара HP обеспечили возможность исследований поведения электронной концентрации N_e , температуры электронов T_e и спектров плазменных и ионных линий. В период экспериментов осуществлялась также регистрация КВ радиосигналов, рассеянных на МИИН различных пространственных масштабов, и спектров ИРИ в килогерцовом диапазоне частот. Для проведения анализа экспериментальных данных (разд.2) выполнены расчеты высот отражения мощной КВ радиоволны обыкновенной поляризации (O – мода) $h_{отрO}$ в направлении магнитного зенита и высот верхнего гибридного резонанса h_{UH} . В табл.1 приведена общая характеристика всех экспериментов, выполненных в октябре 2013 г., вблизи пятой и шестой гармоник гирорезонансов электронов. Здесь представлены высоты двойных резонансов, полученные по данным измерений радаром HP мощности рассеянных сигналов, позволяющие определить высоту возбуждения усиленных нагревом ионных линий h_{HFIL} , а также рассчитанные по модели высотного распределения гирочастоты электронов $f_{ce}(h)$ [17]. Особенностью исследований эффектов вблизи пятой и шестой гармоник гирорезонансов при излучении мощной КВ радиоволны в направлении магнитного поля Земли является то, что высота отражения волны $h_{отрO}$ близка высотам верхнего гибридного резонанса h_{UH} для $n=5$, а для $n=6$ высота отражения $h_{отрO}$ располагается ниже h_{UH} . Тем не менее, как показано в [1], за счет омического нагрева электронов в области отражения плазма «продавливается» вверх и волна достигает области верхнего гибридного резонанса.

Появление в спектрах радара HP инициированных нагревом плазменных HFPL (HF-induced plasma lines) и усиленных ионных HFIL (HF-enhanced ion lines) линий является прямым доказательством развития параметрических распадных (стрикционных) неустойчивостей (PDI и OTSI) на высотах вблизи отражения мощной КВ радиоволны от ионосферы [21, 22, 23, 24]. При возбуждении PDI (parametric decay instability) происходит трехволновой параметрический распад высокочастотной

электромагнитной волны накачки на более слабую высокочастотную волну Ленгмюра (электростатические плазменные колебания) и низкочастотную ионно-акустическую волну [1, 22, 28]. Другой тип неустойчивости, осциллирующая двухпотоковая неустойчивость (oscillating two stream instability, OTSI), также изучалась рядом авторов [29, 30]. Это взаимодействие четырех волн, где происходит распад высокочастотной электромагнитной волны накачки на две противоположно распространяющиеся высокочастотные ленгмюровские волны и ионно-акустическую стоячую волну. Время существования данных неустойчивостей миллисекунды с момента включения мощного нагревного передатчика. Далее по мере развития тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости (thermal parametric instability, TPI), ответственной за генерацию МИИН, происходит подавление PDI и OTSI [1, 28].

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

Суммируя результаты наблюдений вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов, можно выделить следующие особенности.

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

Инициированные нагревом плазменные линии HFPL на сонограммах $S_{PL}(f, t)$ проявлялись в виде двух треков HFPL₁ и HFPL₂, разнесенных по частоте. Плазменные линии HFPL₁ возбуждались на частотах f_{PL1} , близких по значениям частотам волны накачки f_H . Второй вид плазменных линий HFPL₂ возбуждался на более высоких частотах $f_{PL2} \sim f_H + 150 \div 250$ кГц. Плазменные линии регистрировались около двойного резонанса при изменении частот накачки от $(f_{HR} - 100$ кГц) до $(f_{HR} + 30$ кГц). Верхняя граница частотного диапазона соответствует частоте нагрева, на которой регистрировался максимум интенсивности BUM компоненты в спектре ИРИ, $f_{HmaxBUM}$. Мощности плазменных линий S_{PL} резко уменьшались на частотах нагрева, выше двойного резонанса, $f_H > f_{HR}$. Отметим, что при увеличении частоты волны накачки до тех пор, пока выполнялись условия $f_H < f_{HDMmax}$, мощности S_{PL1} и S_{PL2} были сравнимы, а иногда даже $S_{PL1} < S_{PL2}$. По мере возрастания f_H в нагревном цикле, когда $f_H > f_{HDMmax}$, мощности S_{PL1} резко возрастали и становились на 1 – 1.5 порядка выше, чем S_{PL2} . Сравнение пространственно-временных распределений $S_{PL}(t, h)$ и $S_{IL}(t, h)$ показало, что высоты возбуждения HFPL₁ (h_{PL1}) и HFPL₂ (h_{PL2}) в целом соответствуют как высотам формирования ионно-акустических линий HFIL (h_{IL}) с допуском ± 3 км, так и рассчитанным значениями $h_{отрО}$ и $h_{УН}$. Тем не менее,

целесообразно провести дальнейшие исследования для получения более точной картины высотных распределений HFPL и HFIL. Особенностью плазменных линий HFPL₂ являлась близость их высот возбуждения h_{PL2} в течение локального цикла нагрева. Плазменные линии HFPL₂ существовали в условиях, когда наблюдались более высокие значения максимумов мощностей ионно-акустических линий S_{HFIL} (S_{ILU} и $S_{ILD} > 4000$ отн. ед., $S_{ILO} > 1000$) по сравнению со значениями S_{HFIL} , при которых регистрировались только 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_{PL1} и низкочастотную ионно-акустическую волну с частотой f_{IA} ($f_H = f_{IA} + f_{PL1}$) [1, 22, 28]. Экспериментальные данные по спектрам ионных линий свидетельствуют, что на высотах отражения и верхней гибридной высоте (в нашем случае они близки) кроме PDI возникает двухпоточковая осциллирующая неустойчивость (OTSI).

Природа возбуждения HFPL₂ остается невыясненной. В качестве одного из возможных объяснений генерации плазменных волн на частотах f_{PL2} , превышающих частоту накачки мощной КВ радиоволны f_H в экспериментах около пятой гармоники гирорезонанса, может быть рассмотрена возможность взаимодействия в области развития параметрической распадной неустойчивости на высотах отражения и верхней гибридной (совпадающих в экспериментах $f_H \sim 5f_{ce}$) четырех плазменных волн. Предположим, что в области отражения возбуждаются продольные плазменные волны на частотах ионосферы f_{plasm} , в наших экспериментах $f_{plasm} \sim f_H \cdot \cos(12^\circ)$. 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 трех волн возникает четвертая продольная плазменная волна с частотой f_{PL2} . Пусть для четырех частот высокочастотных волн f_B , f_{UH} , f_{plasm} и f_{PL2} выполняется соотношение:

$$f_B + f_{UH} = f_{plasm} + f_{PL2} \quad (2).$$

Для частот волны накачки $f_H \sim 5f_{ce}$ на высотах двойного резонанса можно представить $f_{ce} \sim f_B/5$ ($n=5$). Тогда с учетом (1) и (2) f_{PL2} можно оценить из приближенного выражения

$$f_{PL2} \approx f_B + f_B^2 / f_{plasm} / 50 \quad (3).$$

При этом условие волнового синхронизма имеет вид

$$\mathbf{k}_B - \mathbf{k}_{plasm} = \mathbf{k}_{PL2} - \mathbf{k}_{UH} \text{ или } \mathbf{k}_B + \mathbf{k}_{UH} = \mathbf{k}_{plasm} + \mathbf{k}_{PL2}, \quad (4)$$

где \mathbf{k}_{plasm} , \mathbf{k}_{PL2} – волновые вектора продольных ионосферных плазменных волн, а \mathbf{k}_B и \mathbf{k}_{UH} – волновые вектора поперечных магнитному полю бернштейновских и верхнегибридных волн.

Проведем численные оценки f_{PL2} с использованием (2) и (3) для эксперимента 25 октября 2013 г. В первом цикле нагрева для момента времени $t=14:03$ UT по экспериментальным данным имеем: $h_{IL} = 214$ км, $f_H=6.73$ МГц, $f_B = 5f_{ce} = 6.81$ МГц на высоте h_{IL} по модели [17], $f_{plasm} \approx 6.58 \pm 0.05$ МГц и $f_{UH} = 6.72$ МГц. Значение частоты f_{PL2} , рассчитанное по (2), составляет $f_{PL2} \approx 6.95$ МГц, с использованием выражения (3) – $f_{PL2} \sim 6.95$ МГц и величина добавки к f_B равна 0.14 МГц. По данным

измерений $f_{PL2эксп} \approx 6.95 \pm 0.05$ МГц (значения частот f_{PL1} и f_{PL2} регистрировались с точностью ± 0.05 МГц). Моменту времени $t=14:36$ UT (второй цикл нагрева) соответствовали следующие значения: $h_{PL} = 214$ км, $f_H=6.765$ МГц, $f_B = 5f_{ce} = 6.81$ МГц, $f_{plasm} \approx 6.62 \pm 0.05$ МГц и $f_{UH} = 6.76$ МГц. В этом случае рассчитанные значения составили величину $f_{PL2} \approx 6.95$ МГц по (2), $f_{PL2} \sim 6.95$ МГц с помощью (3), что выше частоты f_B на 0.14 МГц. По результатам измерений $f_{PL2эксп} \approx 6.95 \pm 0.05$ МГц. Проведенные оценки частоты возбуждения плазменных линий HFPL₂ с использованием выражений (2) и (3) находятся в приемлемом соответствии с экспериментально наблюдаемыми значениями f_{PL2} .

Подчеркнем, что вопрос о возбуждении HFPL₂ остается открытым и требует дальнейшего серьезного исследования.

Отличительной чертой экспериментов около пятой гармонике гирорезонанса явилось наблюдение резкого возрастания электронной концентрации N_e на ~ 50 % в широком диапазоне высот выше высоты отражения мощной КВ радиоволны вплоть до высоты порядка 550 км. Оно начиналось при спаде интенсивности DM компоненты перед двойным резонансом и наблюдалось до конца цикла нагрева.

При нагреве на частотах вблизи двойного резонанса f_{HR} уменьшалась мощность рассеянных на МИИН ($l_{\perp} = 7.5 - 9$ м) сигналов $P_{МИИН}$ на -2 – -5 дБ. Для частот $f_H > f_{HR}$ и $f_H > f_{HВUMmax}$ мощность рассеянных сигналов $P_{МИИН}$ становилась выше, чем до пятой гармонике гирорезонанса.

В экспериментах на частотах накачки около шестой гармонике гирочастоты электронов наблюдались следующие особенности.

Мощности максимумов ионных линий в спектре радара HP S_{ILU} , S_{ILD} и S_{ILO} были почти на порядок ниже, регистрируемых около пятой гармонике гирорезонанса. При нагреве на частотах вблизи критической частоты слоя F2, $f_H \sim f_oF2$, мощности максимумов S_{ILU} и S_{ILD} в 2 – 5 раз выше, чем для условий модификации ионосферы на частотах $f_H < f_oF2$.

Инициированные нагревом плазменные линии HFPL возбуждались в течение всего цикла излучения волны накачки в виде одного трека с плазменными частотами, близкими значениям частоты f_H . Высоты регистрации HFPL сопоставимы с высотами возбуждения HFIL. Максимумы мощностей плазменных линий наблюдались (кроме включений) на частотах $f_H \sim f_{HDMmax}$ и $f_H \sim f_{HВUMmax}$.

В условиях модификации ионосферы на частотах f_H ниже f_oF2 ($f_H < f_oF2$) наблюдалось возрастание электронной концентрации N_e на ~ 40 % в широком диапазоне высот от высоты отражения мощной КВ радиоволны до высот порядка 450 км. Аналогично поведению N_e вблизи пятой гирогармоники, оно начиналось при спаде интенсивности DM компоненты перед двойным резонансом. На частотах $f_H > f_{HR} + 45 - 60$ кГц (максимальная интенсивность BUM компоненты) уровень N_e плавно снижался и к концу цикла приближался к значениям N_e , измеренным в первые минуты цикла. В нагревных экспериментах, когда использовали частоты накачки, сопоставимые или превышающие критическую частоту слоя F2 $f_H \geq f_oF2$, возрастания N_e происходили в более узком диапазоне высот по сравнению с условиями нагрева при $f_H < f_oF2$ и повышенный уровень N_e на высотах слоя F2 регистрировался до конца цикла.

В экспериментах на частотах $f_H \sim 6f_{ce}$ наблюдалось очень слабое подавление МИИН с пространственными поперечными масштабами $l_{\perp} = 7.5 - 9$ м. Мощность рассеянных на МИИН сигналов $P_{\text{МИИН}}$ практически не изменялась в течение всего цикла нагрева.

В таблицу 2 сведены основные обобщенные данные, характеризующие поведение параметров ионосферной плазмы (N_e , T_e), усиленных нагревом ионных и плазменных линий HFIL и HFPL, спектральных компонент DM и BUM спектров ИРИ, МИИН около пятой и шестой гармоник гиросрезонансов. Данные приведены для различных соотношений между частотами нагрева f_H и двойных резонансов f_{HR} : $f_H < f_{HR}$, $f_H \approx f_{HR}$ и $f_H > f_{HR}$. Качественная иллюстрация данных, представленных в табл.2, в виде схемы приведена на рис. 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам комплексных исследований явлений в высокоширотной F-области ионосферы, возникающих при нагреве мощными КВ радиоволнами обыкновенной поляризации в направлении магнитного зенита на частотах, вблизи пятой и шестой гиросрезонансов электронов ($f_H = 5f_{ce}$, $6f_{ce}$), представляется возможным выделить следующее.

Детально исследованы особенности поведения спектров радара некогерентного рассеяния радиоволн (930 МГц) в низкочастотном (ионно-акустические волны) диапазоне. В спектрах мощности ионно-акустических линий S_{HFIL} в широком диапазоне сканирования частот нагрева (295 кГц) одновременно наблюдались три максимума S_{ILU} , S_{ILD} и S_{ILO} , что свидетельствует о возбуждении неустойчивостей PDI и OTSI на высотах, близких высоте отражения мощной КВ радиоволны. Интенсивности S_{ILU} , S_{ILD} и S_{ILO} на частотах, ниже двойных резонансов, $f_H < f_{HR}$, были на порядок выше, чем на частотах $f_H > f_{HR}$. Мощности максимумов ионных линий S_{ILU} , S_{ILD} и S_{ILO} в экспериментах около шестой гармоники почти на порядок ниже, регистрируемых вблизи пятой гармоники гиросрезонансов.

Обнаружено существенное различие в поведении инициированных нагревом плазменных линий HFPL вблизи пятой и шестой гармоник гиросрезонансов. Около пятой гармоники гиросрезонанса плазменные линии HFPL на сонограммах $S_{\text{PL}}(f, t)$ наблюдались в виде двух треков HFPL₁ и HFPL₂, разнесенных по частоте. Плазменные линии HFPL₁ возбуждались в процессе параметрической распадной неустойчивости, PDI, на частотах f_{PL1} , близких по значениям частотам волны накачки f_H . Второй вид плазменных линий HFPL₂ возбуждался на более высоких частотах $f_{\text{PL2}} \sim f_H + 150 \div 250$ кГц. Предложен один из возможных механизмов возбуждения HFPL₂ в результате четырехволнового процесса взаимодействия. Плазменная волна с частотой f_{PL2} формируется в области возбуждения параметрической распадной неустойчивости на высоте отражения мощной КВ радиоволны, близкой к высоте верхнего гибридного резонанса, при взаимодействии волн Бернштейна и ионосферных плазменных и верхнегибридных волн, возбуждаемых вследствие трансформации волны накачки. Выполненные оценки частоты возбуждения HFPL₂ находятся в приемлемом соответствии с экспериментально наблюдаемыми значениями $f_{\text{PL2}}^{\text{эксп}}$. Вблизи шестой гармоники гиросрезонанса

инициированные нагревом плазменные линии HFPL возбуждались в течение всего цикла нагрева в виде только одного трека с плазменными частотами, близкими по значениям частоте волны накачки.

Обнаружено возрастание электронной концентрации N_e на 40 – 50% в широком диапазоне высот (до 450 – 500 км) около пятой и шестой гармоник гирорезонансов. Оно начиналось при спаде интенсивности DM компоненты перед двойным резонансом и продолжалось в течение всего периода времени существования BUM компоненты в спектре ИРИ.

Показано, что около пятой гармоники гирорезонанса происходит слабое подавление МИИН с поперечными масштабами $l_{\perp} = 7.5 - 9$ м. Мощность рассеянных сигналов $P_{\text{МИИН}}$ уменьшалась на -2 – -5 дБ. Для частот $f_H > f_{\text{HR}}$ и $f_H > f_{\text{HBUMmax}}$ мощности $P_{\text{МИИН}}$ были выше, чем до двойного резонанса. Для частот накачки около шестой гармоники гирорезонанса мощности рассеянных на МИИН сигналов $P_{\text{МИИН}}$ практически не изменялись в течение цикла нагрева.

Полученные результаты свидетельствуют об одновременном существовании вблизи пятой и шестой гармоник гирорезонансов тепловой параметрической неустойчивости (TPI), параметрической распадной неустойчивости (PDI) и осциллирующей двух потоковой 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. Тромсе (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. 1145.
- [2] Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В., и др. // УФН. 2007. Т. 177. № 3. С. 330.
- [3] Leyser T. V. // Space Sci. Rev. 2001. V. 98. P. 223.
- [4] Благовещенская Н.Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. С. Петербург: Гидрометеиздат. 2001. 288 с.
- [5] Фролов В.Л., Болотин И.А., Комраков Г.П., и др // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т.55. N.6. С.393.
- [6] Грач С.М., Сергеев Е.Н., Яшнов В.А., Котов П.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т.51. №7. С.553.
- [7] Frolov V.L., Sergeev E.N., Ermakova E.N., et al. // Geophys. Res. Lett. 2001. V.28. № 16. P.3103.
- [8] Sergeev E.N., Frolov V.L., Grach S.M., Kotov P.V. // Advances and Space Research. 2006. V. 38. P.2518.
- [9] Sergeev E., Grach S., Shindin A. et al., // Phys. Rev. Lett. 110. N6. 065002 (2013)
10.1103/PhysRevLett.110.065002
- [10] Грач С.М., Сергеев Е.Н., Шиндин А.В. и др. // ДАН. 2014. Т. 454. № 5. С. 526.
- [11] Mahmoudian A., Scales W. A., Bernhardt P. A. et al. // Radio Science V48 N 6, p.685 – 697, 2013
- [12] Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Йоман Т.К., Ритвельд М. Т. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т.53. № 9. С.571.
- [13] Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т.57. №1. С. 1-22.
- [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.
- [16] Greenwald R. A., Baker K. B., Dudeney J. R., et al. // Space Sci. Rev. 1995. V. 71. P. 761.
- [17] «DGRF/IGRF Geomagnetic Field Model 1900 - 2015 and Related Parameters»
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. N.A5. P.6285.
- [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. 2003. 108(A4). P.1141. doi:10.1029/2002JA009543.
- [24] Mishin E., Hagfors T., Kofman W. // J. Geophys. Res. 1997. V.102. P.27265.
- [25] Blagoveshchenskaya N. F., Carlson H. C., Kornienko V. A., et al. // Ann. Geophys. 2009. V.27. P. 131.
- [26] Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Корниенко В. А. и др // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т.50. №8. С. 678-694.
- [27] Popomarenko P.V., Leyser T.V., Thide B. JGR, 1999. V. 104. № A5. P.10081
- [28] Грач С.М. Взаимодействие мощных радиоволн с ионосферой. Часть 1. Возбуждение плазменной турбулентности в верхней ионосфере. Учебное пособие. Нижний Новгород. Нижегородский госуниверситет. 2012. 58С.
- [29] Fejer J.A. // Rev. Geophys. Space Phys. 1979. 17(1). P.135.
- [30] Kuo S.P., Lee M.C., Kossey P. // Geophys. Res. Lett. 1997. 24(A10). P. 2969.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Вариации критических частот регулярного слоя F2 (f_oF2) в период проведения нагревных экспериментов в Тромсе в октябре 2013 г. с 12 до 16 UT. На оси времени отмечены интервалы излучения КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating.

Рис.2. Высотно-временное распределение электронной плотности N_e (а), температуры электронов T_e (б) в диапазоне высот от 130 до 550 км и мощности рассеянных сигналов («сырых» значений плотности электронов N_e) в диапазоне высот от 130 до 278 км с разрешением по высоте порядка 1.5 км (в) по данным радара НР в Тромсё на частоте 930 МГц в период эксперимента 25 октября 2013, когда частота мощной КВ радиоволны О - поляризации изменялась вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов. Спектрограммы искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ), полученные в Тромсе при нагреве $f_H \sim 5f_{ce}$ (г). Циклы излучения отмечены на оси времени скобками. На спектрограммах положение полосы ИРИ на оси ординат представлено со смещением по оси частот, чтобы максимум в спектре ИРИ на частоте нагрева f_H в любой момент отсчета соответствовал $\Delta f=0$.

Рис. 3. Данные измерений HFIL радаром НР г.Тромсе при нагреве около пятой гармоники гирорезонанса 25 октября 2013г. Спектры HFIL на различных высотах, наблюдаемые при регистрации максимальной интенсивности DM компоненты ИРИ перед двойным резонансом (колонка t1), максимального подавления DM компоненты (t2) и максимальной интенсивности BUM компоненты (t3). Вариации от времени мощности максимумов S_{ILD} , S_{ILO} и S_{ILU} в цикле нагрева 14:01 – 14:21 UT (а, б, в). Значения S_{IL} приведены в относительных единицах. Для вариантов t1 – t3 представлены спектры мощности HFIL, S_{IL} , на трех высотах, относительные мощности максимумов S_{IL} которых были наибольшими для данного момента времени. На каждой панели для локальной высоты разными линиями приведены три спектра, измеренные через 20с в одноминутном интервале.

Рис. 4. Результаты измерений радаром НР HFPL 25 октября 2013 г. в период 14:00 – 15:25 UT, когда частота мощной КВ радиоволны изменялась вблизи пятой гармоники гирорезонанса в диапазоне $f_H \in [6.700 – 6.995]$ МГц циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза с 14.01 UT. На оси времени отмечены циклы нагрева и моменты двойных резонансов. Спектрограмма $f_{HFPL}(t)$ в области высот 128 – 302 км (а). Вариации мощностей плазменных линий $S_{PL1}(t)$ трека HFPL₁(б) и $S_{PL2}(t)$ трека HFPL₂(в) на заданных высотах. Пространственно – временное распределение HFPL₁ (г) и HFPL₂ (д) в диапазоне высот 200–240 км.

Рис.5. Высотно-временное распределение электронной плотности N_e (а), температуры электронов T_e (б) в диапазоне высот от 140 до 450 км и N_{raw} в диапазоне высот от 130 до 278 км (в) по данным радара НР в Тромсё на частоте 930 МГц в период эксперимента 29 октября 2013 г., когда частота мощной КВ радиоволны О - поляризации изменялась вблизи шестой гармоники гирочастоты электронов. Спектрограммы искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ), полученные в Тромсе при нагреве

$f_H \sim 6f_{ce}$ (г). На оси времени скобками показаны циклы нагрева и отмечены моменты регистрации двойных резонансов по данным ИРИ.

Рис. 6. Данные измерений HFIL радаром НР в г.Тромсе в экспериментах около шестой гармоники гирорезонанса 29 октября 2013 г. Спектры HFIL на различных высотах в моменты времени, соответствующие времени регистрации максимальной интенсивности DM компоненты ИРИ перед двойным резонансом (для условий нагрева на частотах $f_H < f_oF2$ колонка – t1 и $f_H \sim f_oF2$ – t4), максимального подавления DM компоненты при $f_H \sim f_{HR}$ и $f_H < f_oF2$ (t2) и максимальной интенсивности BUM компоненты при $f_H < f_oF2$ (t3). Спектры приведены для трех фиксированных высот через 3 км с наиболее высокими значениями S_{ILO} , S_{ILU} и S_{ILD} . Аналогично рис.3, для каждой локальной высоты разными линиями показаны три спектра, измеренные через 20 с, в одноминутном интервале. Вариации от времени S_{ILD} , S_{ILO} и S_{ILU} с 14:00 до 14:55 UT (а, б, в). На оси времени отмечены моменты двойных резонансов в циклах нагрева.

Рис. 7. Данные измерений радаром НР HFPL 29 октября 2013 г. в период 14:00 – 14:55 UT, в экспериментах вблизи шестой гармоники гирорезонанса, $f_H \in [7.7950 - 8.245]$ МГц. Циклы нагрева и моменты двойных резонансов отмечены на осях времени. Спектрограмма $f_{HFPL}(t)$ в области высот 209 – 383 км (а). Вариации мощности плазменных линий $S_{PL}(t)$ трека HFPL на фиксированных высотах (б). Пространственно – временное распределение HFPL (в) в диапазоне высот 200–260 км.

Рис.8. Данные наблюдений когерентным КВ доплеровским радаром CUTLASS (Ханкасалми, Финляндия, луч 5, ориентированный на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсё) на частотах 16.3, 18 и 19.9 МГц в нагревных экспериментах в г. Тромсё 25 и 29 октября 2013 г. Динамика мощностей рассеянных сигналов в искусственно возмущенной области ионосферы над Тромсе 25.10.13 (а) и 29.10.13 (б). Вариации мощностей рассеянных сигналов в координатах дальность (номер ворот Rg) – мировое время для различных частот радара CUTLASS 25.10.13(a1–a3) и 29.10.13 (б1–б3). Циклы нагрева и времена двойных резонансов отмечены на оси времени.

Рис.9. Динамические доплеровские спектры радиосигнала $f_{диагн} = 15670$ кГц на трассе Новосибирск – Тромсё – С.-Петербург, измеренные методом ракурсного рассеяния 25 октября 2013 г. с 14:00 до 15:00 UT (а) и временные вариации относительной спектральной мощности рассеянных сигналов (б). Периоды излучения нагревного стенда EISCAT/Heating отмечены на оси времени.

Рис. 10. Качественная картина поведения различных спектральных компонент ИРИ (DM и BUM), $R_{мин}$, параметров ионосферной плазмы (T_e , N_e , HFIL, HFPL) при нагреве ионосферы на частотах вблизи пятой и шестой гармоник гирорезонансов по мере роста f_H ($f_H < f_{HR}$, $f_H \approx f_{HR}$, и $f_H > f_{HR}$).

Таблица 1

Общая характеристика экспериментов, выполненных на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating в октябре 2013 г. при нагреве высокоширотной F-области ионосферы на частотах накачки вблизи пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов $f_H \sim n f_{ce}$ ($n = 5, 6$).

Дата 2013г. /W	Время начала цикла нагрева, УТ	Диапазон изменения f_H , МГц	Номер гармони ки гиро- резонанс а п	foF2, МГц	Время двойного резонанса , t_R , УТ	Частота двойного резонанса, f_{HR} МГц	Высота двойного резонанса, $h_{HR_модель}$, км	Высота h_{R_HFIL} , км
22.10	12.01	7.950 – 8.245	6	9.75	–			224
179	13.01	7.950 – 8.245	6	10.35	–			220
	14.01	8.000 – 8.300	6	9.55	–			221
	14.31	6.600 – 6.895	5	9.1	–			214
	15.01	6.700 – 6.995	5	8.9	–			217
23.10	12.01	6.700 – 6.995	5	10.1	12:11:20	6.855	204	203
228	12.31	6.700 – 6.995	5	9.85	12:41	6.85	206	206
	13.01	6.700 – 6.995	5	9.5	13:10:20	6.84	209	209
	13.31	6.700 – 6.995	5	9.5	13:40:20	6.84	209	212
25.10	14.01	6.700 – 6.995	5	9.6	14:10:40	6.845	207	207
148	14.31	6.700 – 6.995	5	8.6	14:40:20	6.84	209	209
	15.01	6.700 – 6.995	5	8.1	15:09:00	6.82	214	215
26.10	14.01	6.700 – 6.995	5	8.8	14:10:00	6.835	210	210
148	14.31	6.700 – 6.995	5	8.3	14:38:40	6.815	219	220
27.10	14.01	8.000 – 8.295	6	9.35	14:12:00	8.165	222	224
171	14.31	7.950 – 8.245	6	8.5	14:43	8.13	232	230
28.10	14.01	7.950 – 8.245	6	8.8	14:13	8.13	232	232
206	14.36	7.950 – 8.245	6	8	14:49	8.07	250	250
29.10	14.01	7.950 – 8.245	6	9.5	14:15	8.16	223	222
155	14.31	7.950 – 8.245	6	8.2	14:41	8.1	240	238

Примечания: 22.10.2013 измерения ИРИ не проводились

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

Соотношение между f_H и f_{HR}	Наблюдаемые явления и их характеристики	Частоты накачки f_H относительно f_{HR} , f_{HDMmax} , $f_{HBUMmax}$, кГц
$f_H < f_{HR}$ $\approx 5f_{ce}$	Максимум интенсивности I_{DM}	f_{HDMmax}
	Наблюдение усиленных нагревом ионно- акустических линии HFIL _{U&D&0}	Цикл нагрева
	Появление инициированных нагревом плазменных линии HFPL 1	$f_{HR} - (85 \div 100)$
	HFPL 2	$f_{HR} - (75 \div 100)$
	Уменьшение T_e на (30 ÷ 40)%	$f_{HDMmax} + (15 \div 25)$
	Возрастание N_e на высотах слоя F2 и выше на (25 ÷ 50)%	$f_{HDMmax} + (10 \div 15)$
$f_H \approx f_{HR}$ $\approx 5f_{ce}$	Подавление I_{DM}	$f_{HR} \pm (5 \div 15)$
	Ослабление $P_{мин}$ на - 2 ÷ - 5 дБ	$f_{HR} + (10 \div 20)$
	Подавление мощности HFPL1	$f_{HR} + (25 \div 40)$
	Подавление мощности HFPL2	$f_{HR} + (15 \div 25)$
$f_H > f_{HR}$ $\approx 5f_{ce}$	Усиление I_{DM}	$f_{HR} + (20 \div 30)$
	Регистрация BUM	$f_{HR} + (5 \div 135)$
	Максимум интенсивности BUM	$f_{HBUMmax}$
	Локальное возрастание T_e на фоне уменьшения T_e	$f_{HR} + (20 \div 50)$

$f_H < f_{HR}$ $\approx 6f_{ce}$	Максимум интенсивности I_{DM}	f_{HDMmax}
	Наблюдение усиленных нагревом ионно- акустических линии HFIL _{U&D}	Цикл нагрева
	Наблюдение усиленных нагревом ионно- акустических линии HFIL ₀	от f_{HR} до конца цикла
	Наблюдение инициированных нагревом плазменных линии HFPL	Цикл нагрева
	Уменьшение T_e на (30 ÷ 40)%	$f_{HDMmax} + (5 \div 20)$
	Возрастание N_e на высотах слоя F2 и выше на (10 ÷ 20)%	$f_{HDMmax} + (5 \div 10)$, $f_H < foF2$ f_{HDMmax} , $f_H \sim foF2$

$f_H \approx f_{HR}$ $\approx 6f_{ce}$	Подавление I_{DM}	$f_{HR} \pm (5 \div 15)$
	Подавление мощности HFPL	$f_{HR} + (25 \div 40)$
$f_H > f_{HR}$ $\approx 6f_{ce}$	Усиление I_{DM}	$f_{HR} + (20 \div 30)$
	Регистрация BUM	$f_{HR} + (5 \div 135)$
	Максимум интенсивности BUM	$f_{HBUMmax}$
	Локального возрастания T_e на фоне уменьшения T_e	$f_{HR} - (10 \div 15), f_H < foF2$ $f_{HR}, f_H \sim foF2$

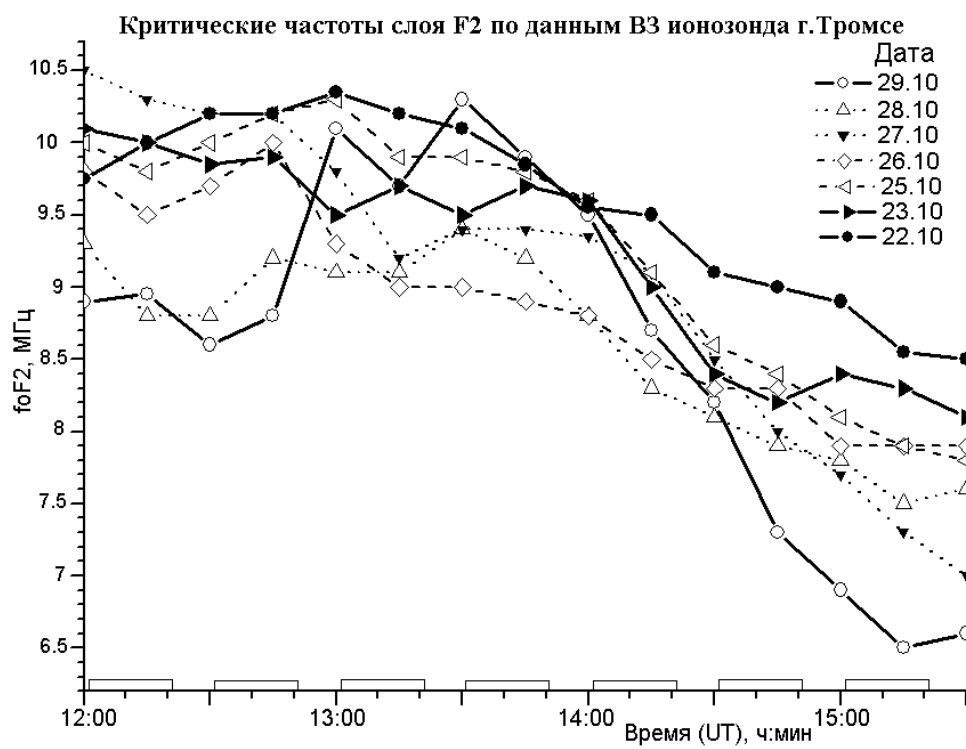


Рис.1

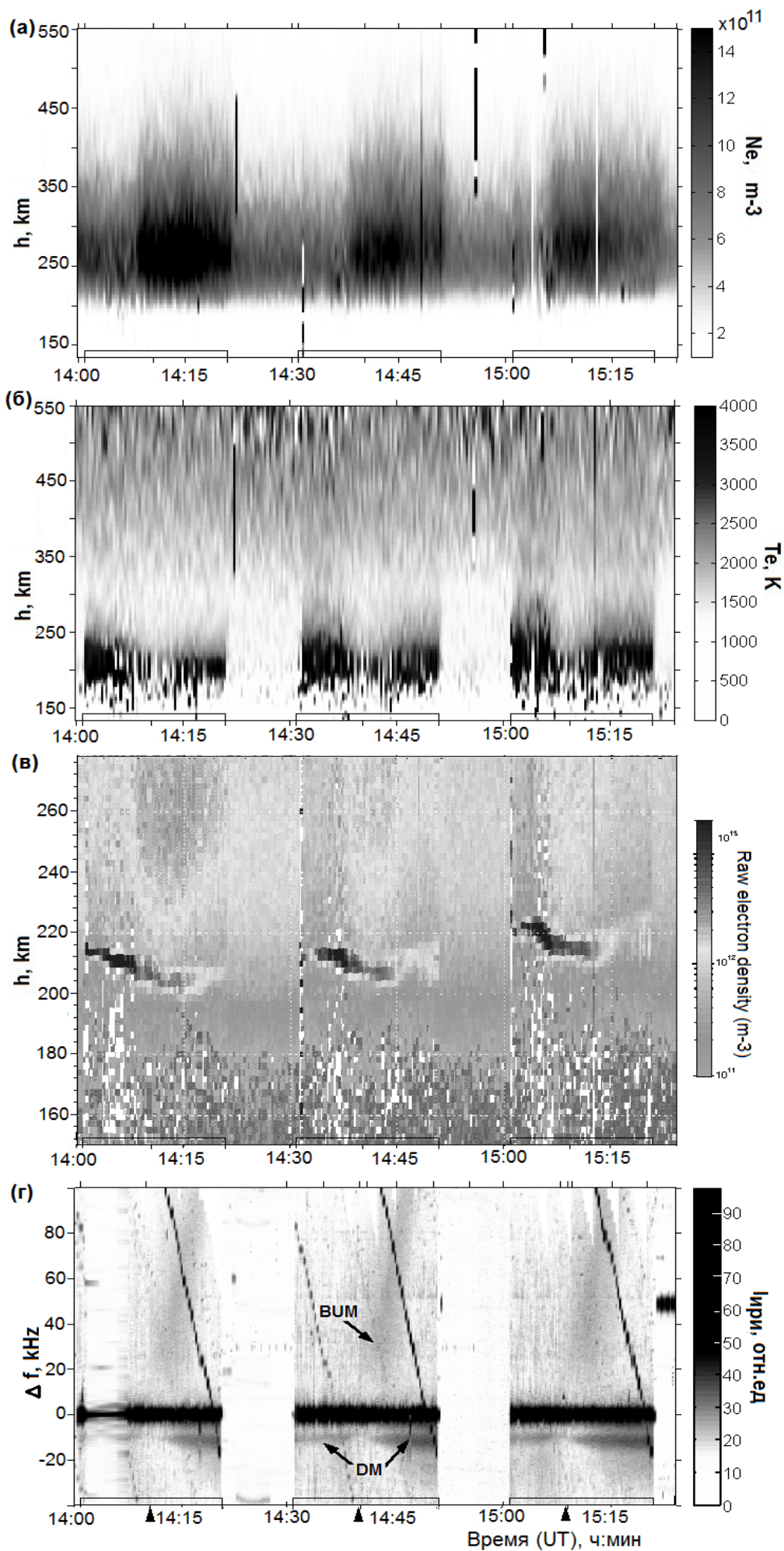


Рис.2 .

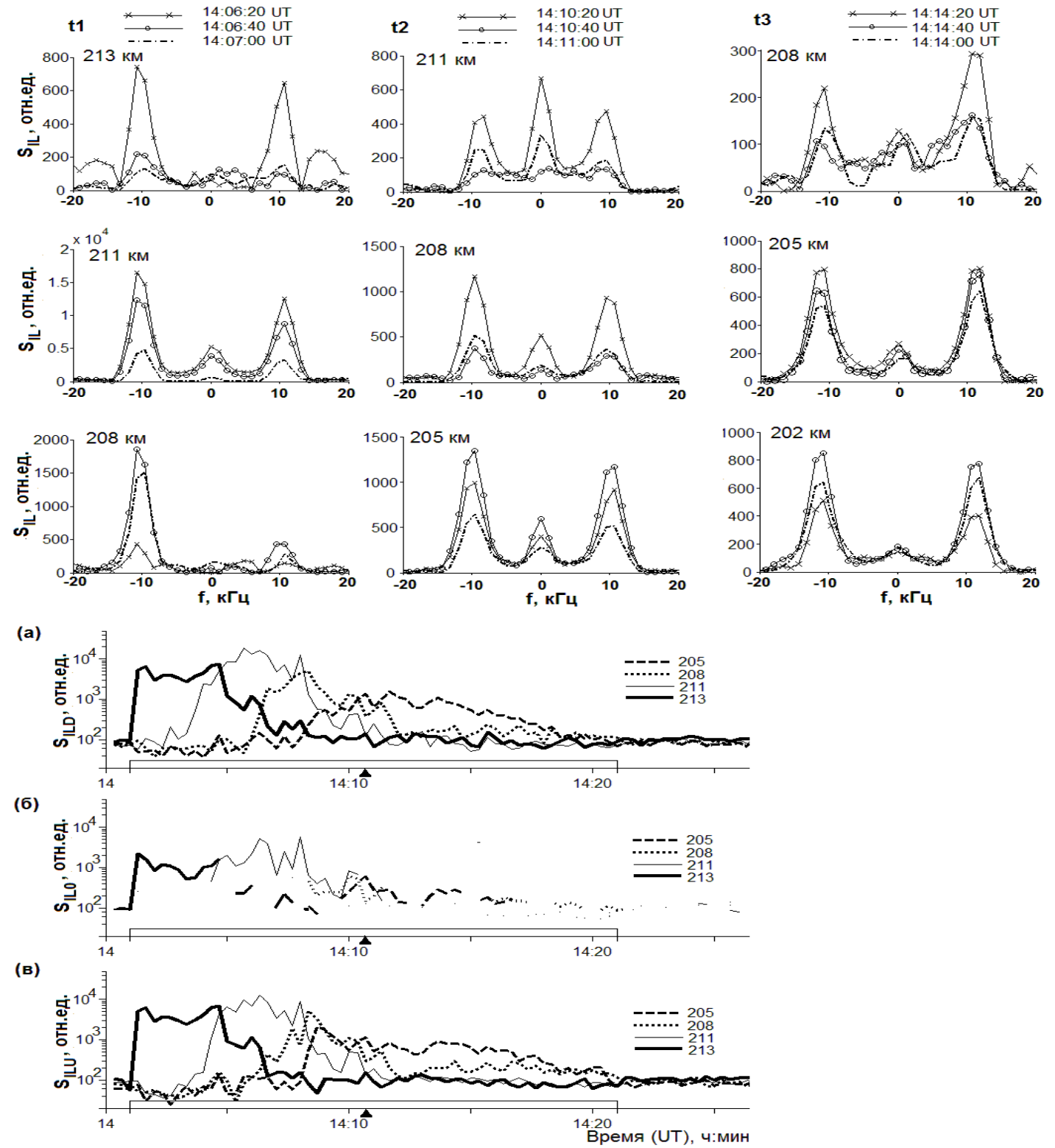


Рис. 3.

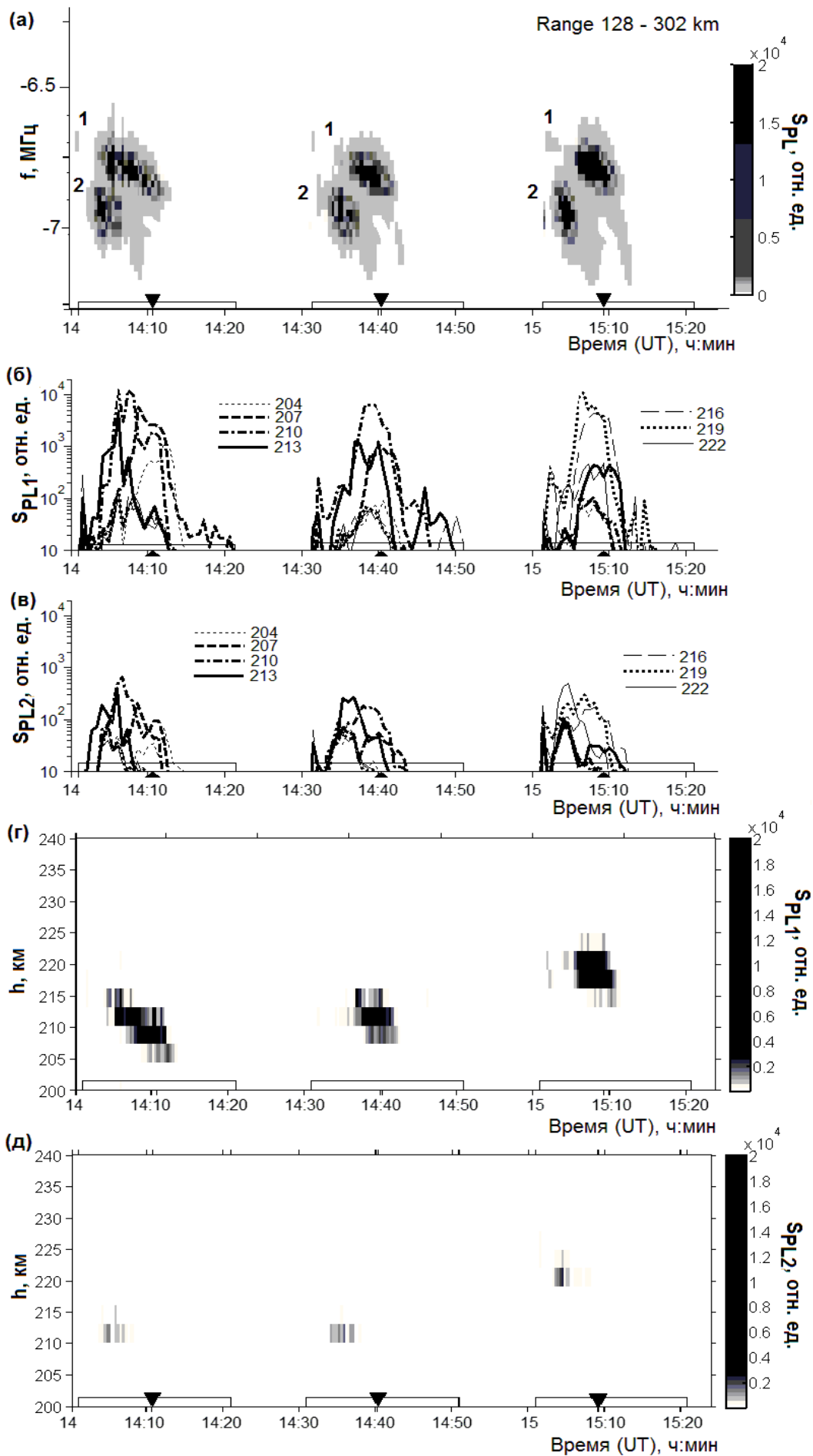


Рис. 4

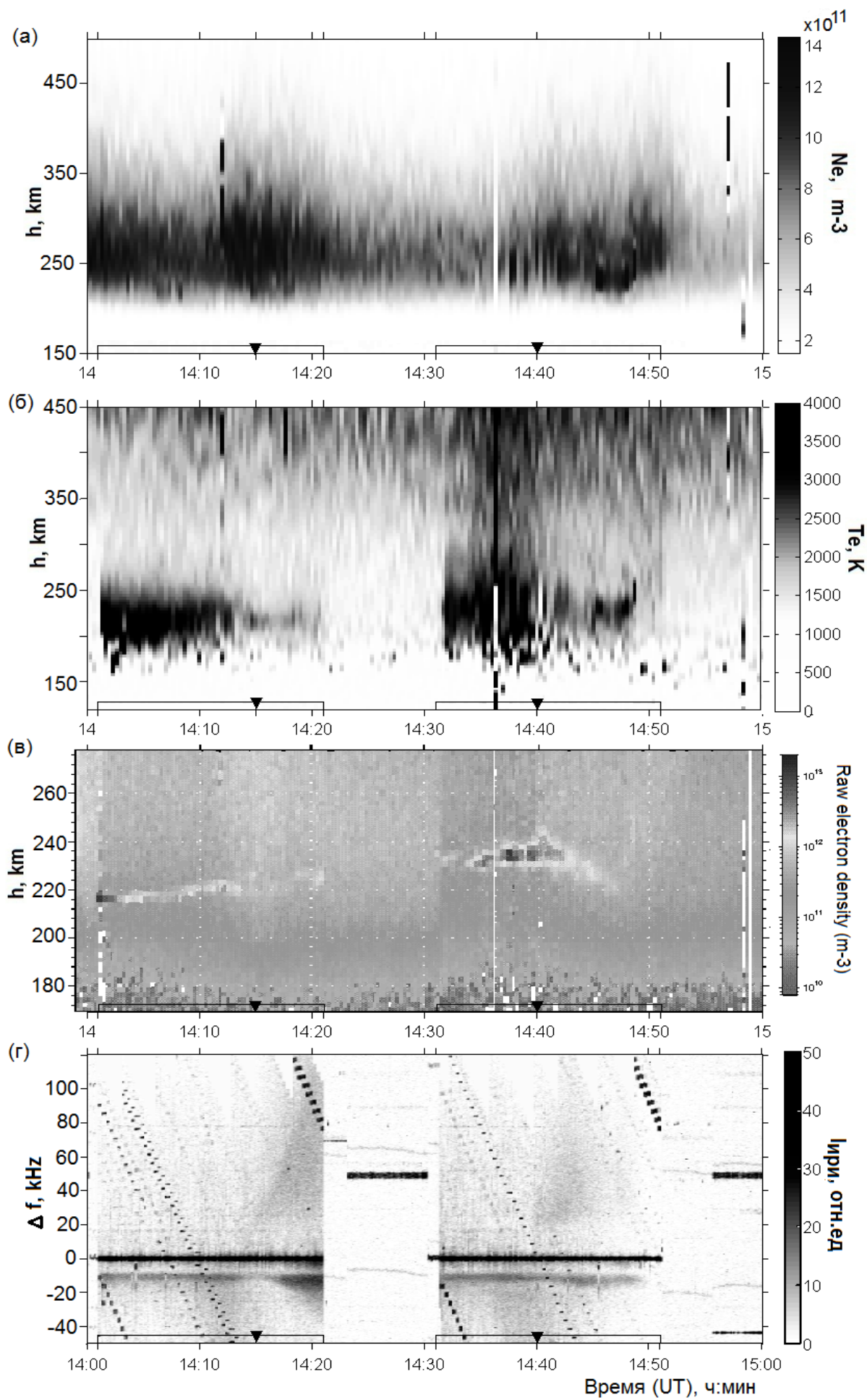


Рис.5

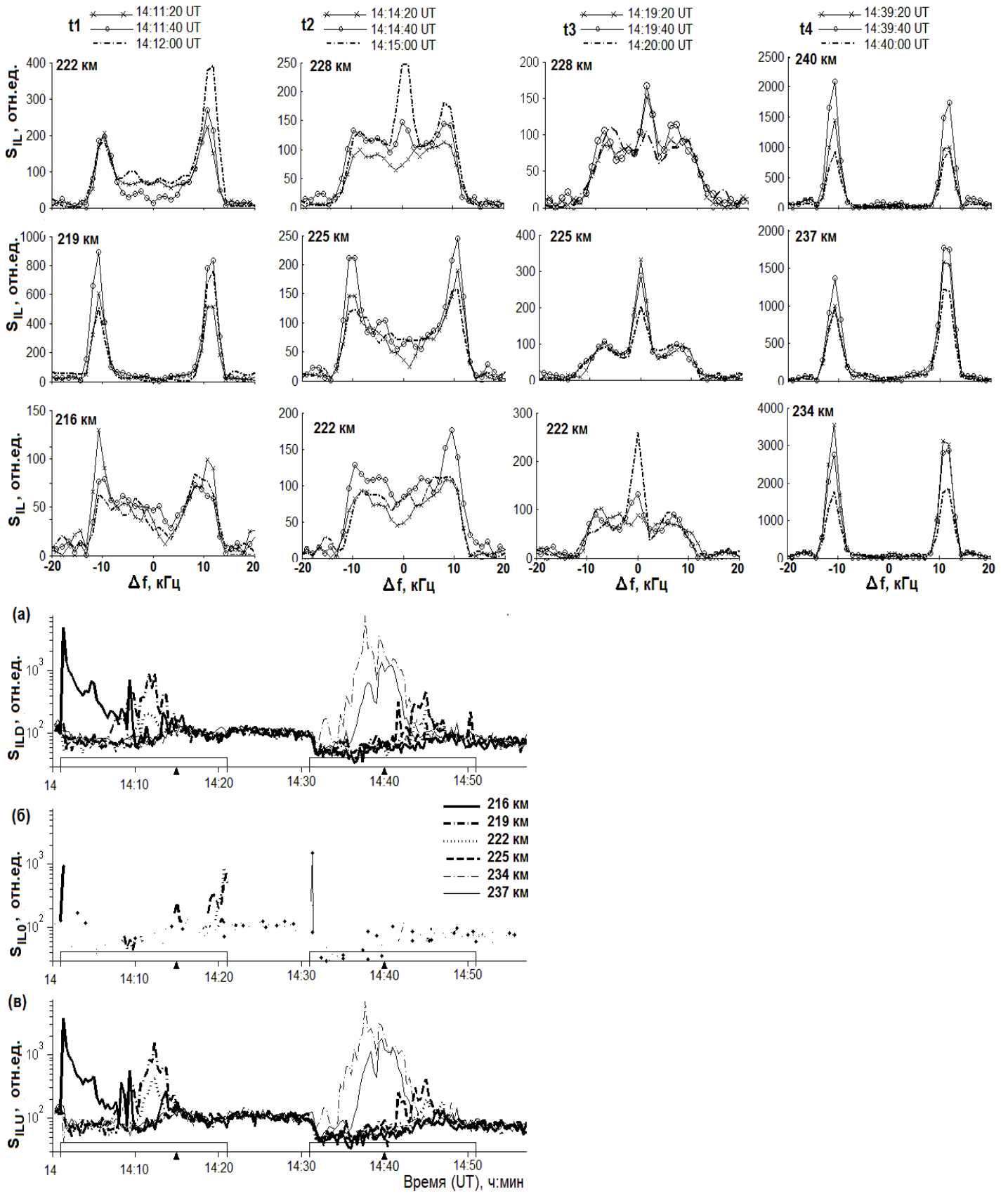


Рис. 6.

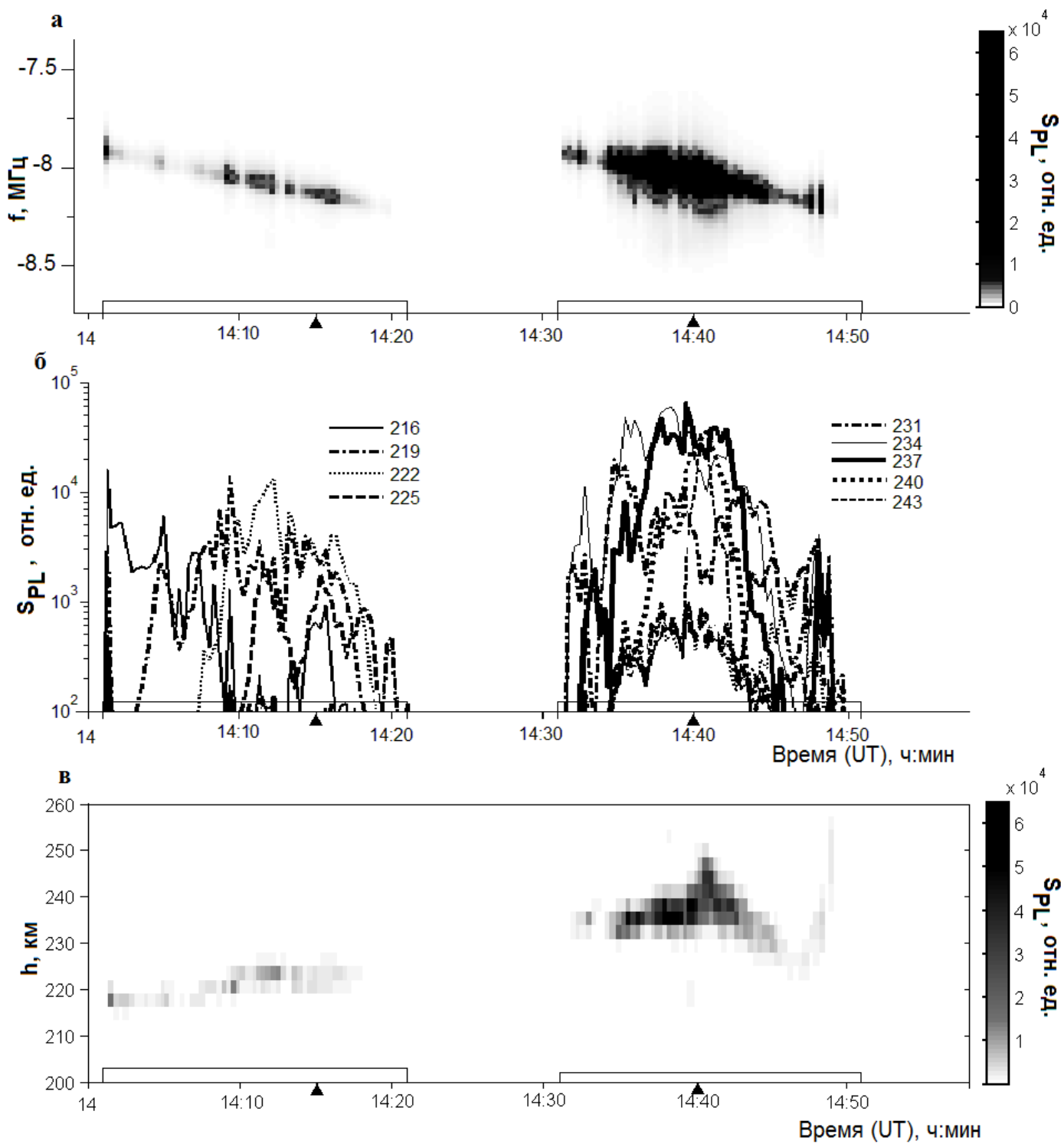


Рис. 7.

SUPERDARN PARAMETER PLOT

Hankasalmi: Beam 5

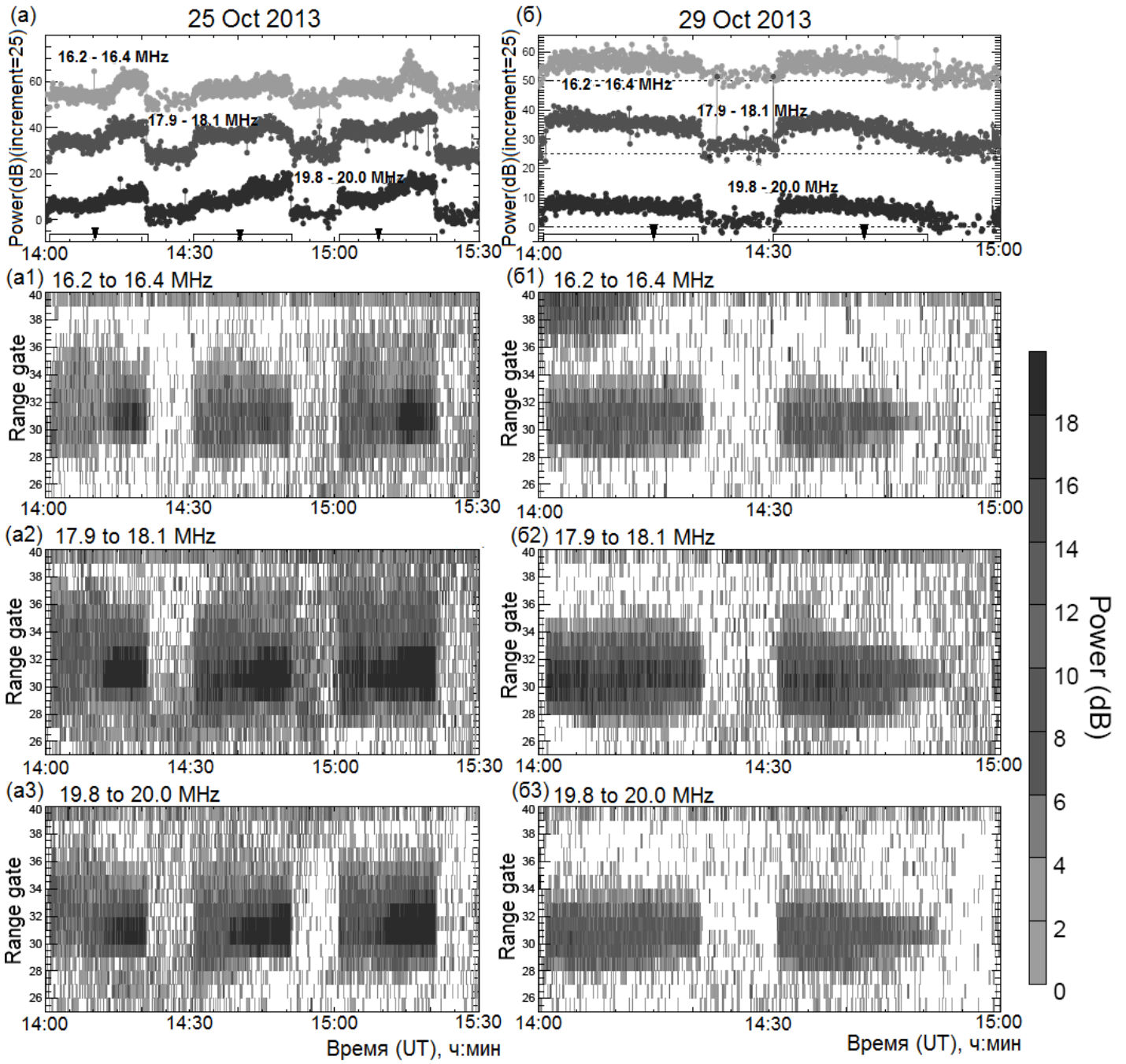


Рис.8.

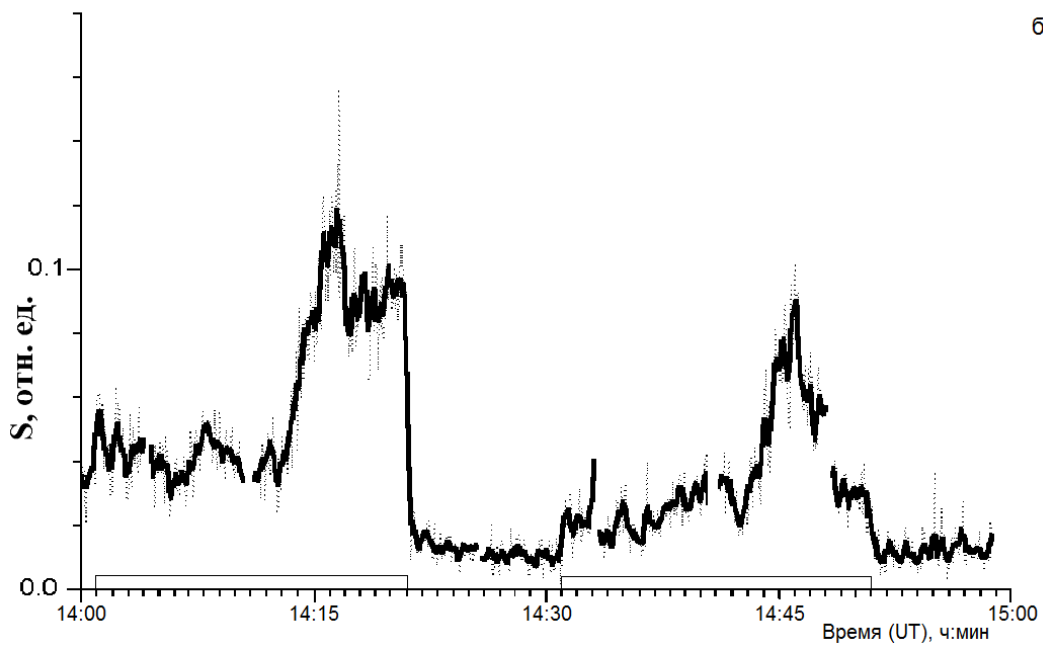
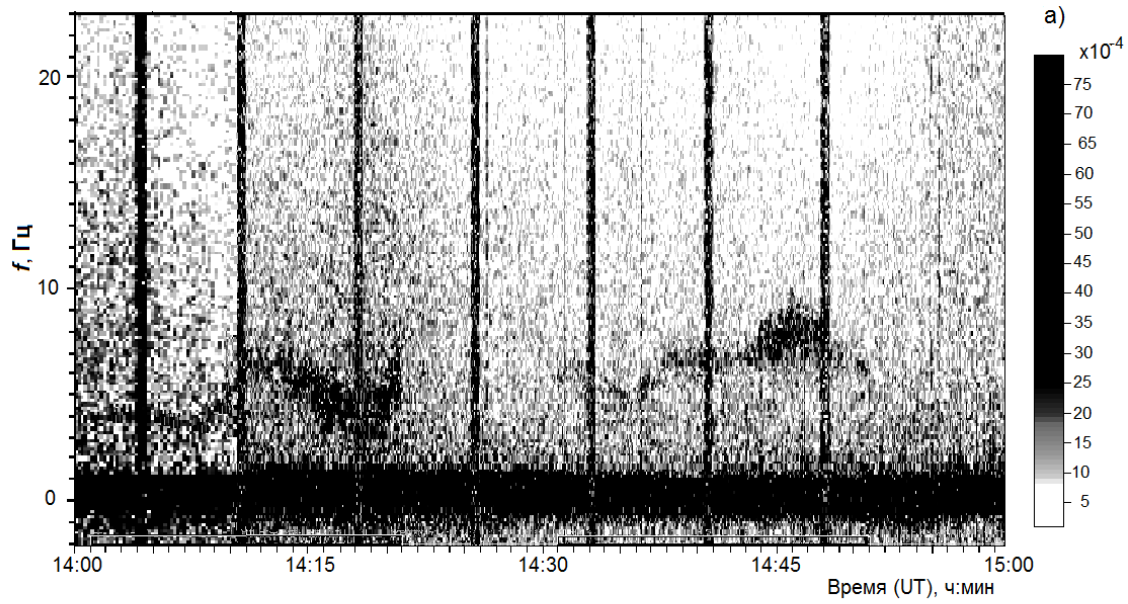


Рис.9.

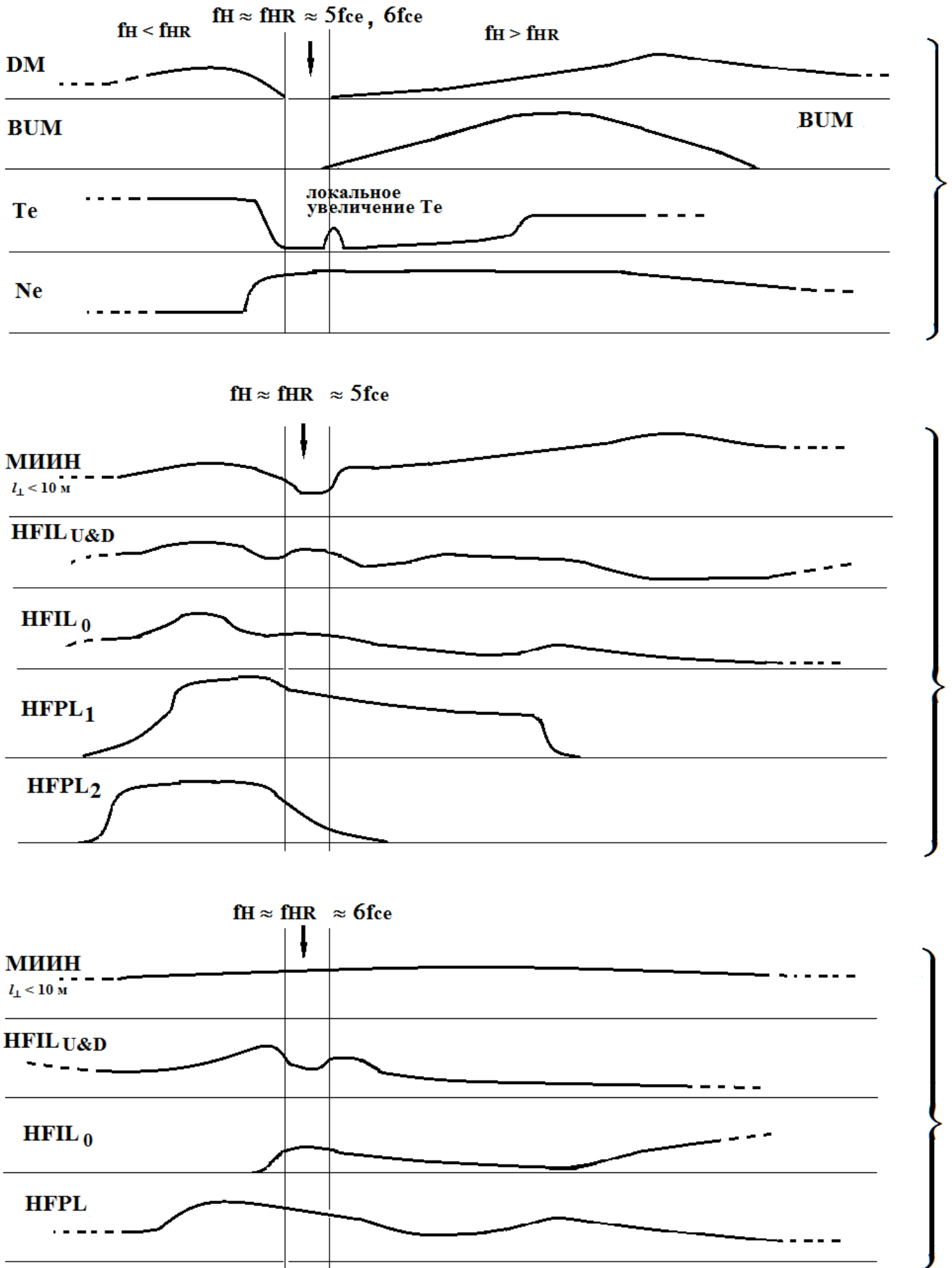


Рис.10.