

УДК 533.951+537.868

ЭФФЕКТЫ МОДИФИКАЦИИ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ КОРОТКОВОЛНОВЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ. 1. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Н. Ф. Благовещенская¹, Т. Д. Борисова¹, Т. К. Йоман², М. Т. Ритвельд³

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия

² University of Leicester, Leicester, UK

³ EISCAT Scientific Association, Ramfjordmoen, Norway

Представлены результаты комплексных экспериментов по воздействию мощного коротковолнового радиоизлучения на высокоширотную ионосферу с использованием технических средств Европейской научной ассоциации EISCAT. Впервые обнаружено возбуждение интенсивных мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при нагреве F -области ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением необыкновенной поляризации (Х-мода) вблизи высоты, где критическая частота f_{xF_2} необыкновенной волны слоя F_2 равна частоте нагрева f_H , сопровождающееся повышением температуры электронов до 50 %. По данным радара некогерентного рассеяния радиоволн в режиме сканирования по углам возвышения в диапазоне от 92° до 74° с шагом 2° детально исследована пространственная структура искусственно возмущённой F -области ионосферы. Показано, что её размеры существенно зависят от угла между направлением распространения мощной радиоволны КВ диапазона относительно направления магнитного поля Земли. По данным комплексных наблюдений исследованы явления, происходящие в искусственно модифицированной F -области ионосферы при нагреве на частотах вблизи частоты третьей гармоники гирочастоты электронов, т. е. при $f_H = 3f_{ce} = f_{UH}$, где f_{UH} — верхнегибридная частота.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие резко возрос интерес к проблеме модификации высокоширотной ионосферы мощным коротковолновым (КВ) радиоизлучением как в сугубо научном, так и в прикладных аспектах. В значительной степени это вызвано завершением строительства супермощного КВ нагревного комплекса в Гаконе (Аляска, США, проект HAARP). В марте 2007 года комплекс HAARP выведен на запланированную максимальную эффективную мощность излучения 3 600 МВт. В 2004 году Великобритания построила на архипелаге Шпицберген КВ нагревный комплекс SPEAR, который является единственным нагревным комплексом, расположенным за Полярным кругом. С 2008 года комплекс SPEAR принадлежит университету и научному центру в Лонгьербине, архипелаг Шпицберген. В сентябре 2009 года завершена полная модернизация КВ нагревного комплекса в Аресибо (Пуэрто-Рико, США).

При воздействии мощным КВ радиоизлучением на ионосферную плазму наблюдается широкий комплекс явлений [1]. К основным из них следует отнести развитие параметрических (стрикционной и тепловой) неустойчивостей вблизи уровня отражения мощной радиоволны обыкновенной поляризации (О-поляризация), вызывающих генерацию интенсивных плазменных колебаний, повышение температуры электронов, возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и искусственного радиоизлучения, ускорение электронов фоновой плазмы до сверхтепловых скоростей, что, в свою очередь, приводит к искусственному оптическому излучению из возмущённой области ионосферы и искусственной ионизации плазмы. Необходимо отметить, что в высокоширотной ионосфере, где в естественных условиях наблюдаются интенсивные горизонтальные (электроджет) и продольные токи, неоднородности различных масштабов, потоки высыпающихся частиц, неустойчивости плазмы и т. д., под действием мощного КВ

радиоизлучения возникают новые явления, в частности генерация мелкомасштабной системы продольных токов, модификация дуг полярных сияний, инициация локальных авроральных возмущений, принципиально невозможных в средних широтах [2].

Научная результативность экспериментов по модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением определяется следующими факторами:

1) технические характеристики нагревного комплекса (эффективная мощность излучения, диапазон частот нагрева, возможность автоматического управления комплексом и изменения диаграммы направленности антенной системы, возможность быстрого изменения режимов нагрева и т. д.);

2) использование разнообразных и высокоэффективных средств диагностики;

3) многообразие свойств и состояний ионосферной плазмы, которая подвергается воздействию мощного КВ радиоизлучения. Всем перечисленным условиям в полной мере удовлетворяет КВ нагревной комплекс EISCAT/Heating в Тромсё (Норвегия). Существенным достоинством нагревного комплекса в Тромсё является нахождение рядом с ним радара некогерентного рассеяния радиоволн, обеспечивающего диагностику необходимых параметров ионосферной плазмы, важных для интерпретации получаемых результатов.

В конце 2008 года было заключено соглашение между Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ) и Европейской научной ассоциацией EISCAT (European incoherent scatter — Европейский радар некогерентного рассеяния). В рамках этого соглашения российские специалисты получили право на проведение экспериментов с использованием технических средств Европейской научной ассоциации EISCAT, не имеющих аналогов в нашей стране как по своим техническим характеристикам, так и по географическому расположению. Конкретно имеется ввиду КВ нагревный комплекс EISCAT/Heating в г. Тромсё (Норвегия) и система высокоширотных радаров некогерентного рассеяния радиоволн в северной Скандинавии и на архипелаге Шпицберген. Учитывая, что Россия не располагает аналогичными высокоэффективными техническими средствами в высоких широтах и вряд ли сможет их построить в обозримом будущем, проведение исследований на оборудовании EISCAT является чрезвычайно важным. Регулярное проведение экспериментов (две нагревные кампании в год) начато с марта 2009 года.

В данной работе представлены результаты комплексных экспериментов по воздействию мощного КВ радиоизлучения на высокоширотную ионосферу с использованием технических средств Европейской научной ассоциации EISCAT, полученных специалистами ААНИИ в периоды глубокого минимума солнечной активности (5–12 марта 2009 года, 29 октября–6 ноября 2009 года и 2–8 марта 2010 года). Целью настоящей статьи является анализ особенностей возбуждения и эволюции мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и сопровождающих их возмущений параметров ионосферной плазмы, т. е. температуры и концентрации электронов, в F -области высокоширотной ионосферы.

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в исследованиях мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, ряд важных аспектов остаётся невыясненным. Широко известно, что возбуждение указанных неоднородностей объясняется в рамках теории тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости [3–5]. Тепловая параметрическая неустойчивость развивается при отражении мощного КВ радиоизлучения обыкновенной поляризации (О-мода) от ионосферы либо на частотах нагрева несколько выше критической частоты f_{oF_2} , когда частота обыкновенной волны порядка верхнегибридной частоты f_{UH} в максимуме слоя F_2 [3, 4]. Максимальный поперечный по отношению к магнитному полю масштаб ионосферных неоднородностей на линейной стадии тепловой параметрической неустойчивости определяется величиной $l_{\perp} = c/f_H$, где f_H — частота нагрева, c — скорость света. Например, для $f_H = 4$ МГц

значения $l_{\perp}$ составляют 75 м. Размер мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей вдоль магнитного поля в ионосфере определяется длиной электронной теплопроводности и может достигать 30÷50 км. Только обыкновенная волна при вертикальном или близком к нему распространении достигает области резонанса. Необыкновенная волна (Х-мода) всегда отражается от области, лежащей ниже резонансной, поэтому возбуждение мелкомасштабных ионосферных неоднородностей за счёт тепловой резонансной неустойчивости в этом случае невозможно.

В данной работе основной акцент сделан на исследовании возможности, условий возбуждения и поведения мелкомасштабных ионосферных неоднородностей при нагреве F -области высокоширотной ионосферы мощным КВ радиоизлучением необыкновенной поляризации (Х-мода). Другой аспект данной работы связан с исследованием пространственной структуры и размера искусственно возмущённой области ионосферы по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсё при излучении мощных коротких радиоволн в магнитный зенит и в вертикальном направлении. В настоящее время отсутствуют достаточно полные систематические и комплексные исследования поведения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей различных пространственных масштабов $l_{\perp}$ и различных характеристик плазменной турбулентности в высокоширотной ионосфере в зависимости от отстройки частоты нагрева относительно частоты гирорезонанса. В данной работе рассмотрены результаты комплексного исследования поведения и свойств мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с различными пространственными масштабами ($l_{\perp} \approx 8; 12$ и 15 м), а также искусственного радиоизлучения ионосферы и параметров искусственно возмущённой ионосферной плазмы в F -области (по данным радара некогерентного рассеяния в Тромсё) при нагреве ионосферы на частотах вблизи третьей гармоники гирочастоты электронов.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ

При проведении экспериментов модификация высокоширотной ионосферы осуществлялась с помощью КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating ($69,6^{\circ}$ с. ш., $19,2^{\circ}$ в. д., параметр Мак-Илвейна $L = 6,2$, магнитное наклонение $I = 78^{\circ}$), технические характеристики которого приведены в [6]. Для большинства дней наблюдений относительное число солнечных пятен W имело нулевое значение. Магнитные условия также были спокойными. В период экспериментов эффективная мощность излучения составляла 190÷250 МВт, частота нагрева менялась в различных экспериментах от 3,9 до 5,4 МГц в зависимости от фонового состояния ионосферы. Использовалась антенная система, обеспечивающая ширину диаграммы направленности КВ нагревного комплекса порядка $12^{\circ} \div 14^{\circ}$. Состояние ионосферы контролировалось с помощью диназонда (ионозонда) в Тромсё, обеспечивающего получение ионограмм вертикального зондирования 1 раз в 4 минуты.

При изучении мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей нагрев ионосферы мощным КВ радиоизлучением Х-поляризации осуществлялся циклами с длительностью 10 мин. Длительность пауз между нагревными циклами варьировалась от 5 до 40 мин. Мощное КВ радиоизлучение направлялось в магнитный зенит, т. е. диаграмма направленности антенны нагревного комплекса была отклонена на 12° от вертикали к югу. Диагностика мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей проводилась с использованием системы КВ радаров CUTLASS (SUPERDARN) в Финляндии и Исландии [7]. Измерения проводились на трёх частотах (приблизительно 10; 13 и 17 МГц) одновременно, оба радара CUTLASS использовали узконаправленную антенну с шириной луча примерно $3,3^{\circ}$, ориентированную на искусственно возмущённую область ионосферы над Тромсё. Пространственное разрешение по дальности составляло 45 км в экспериментах марта и октября–ноября 2009 года и 15 км в марте 2010 года.

Для диагностики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей также применялся многоканальный приёмный доплеровский КВ комплекс для регистрации диагностических сигналов методом ракурсного рассеяния, установленный в обсерватории ААНИИ «Горьковская» под г. Санкт-Петербург. Исследование параметров ионосферной плазмы (электронной концентрации N_e , температуры электронов T_e и ионов T_i , скоростей ионов V_i) осуществлялось с помощью расположенного вблизи Тромсё радара некогерентного рассеяния радиоволн на частоте 930 МГц [8], обеспечивающего проведение измерений с разрешением 5 с по времени и 3 км по высоте в диапазоне высот от 90 до 600 км. Измерения выполнялись вдоль направления магнитного поля в Тромсё, т. е. в направлении магнитного зенита.

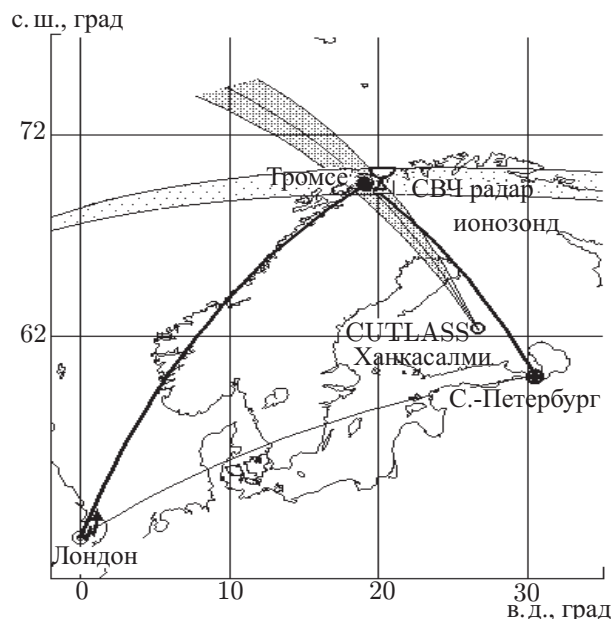


Рис. 1. Карта-схема, поясняющая геометрию расположения нагревного стенда EISCAT/Heating, а также диагностических средств наблюдений, использованных в экспериментах

Для исследования явлений при нагреве ионосферы на частотах вблизи третьей гармоники гирочастоты электронов мощное КВ радиоизлучение О-поляризации направлялось в магнитный зенит циклами, включающими период нагрева с длительностью 2 мин и паузу с такой же длительностью. При этом частота нагрева изменялась в каждом нагревном цикле на $5\div 10$ кГц в диапазоне от 3 900 до 4 200 кГц. Для диагностики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и параметров ионосферной плазмы использовались КВ радары CUTLASS в Финляндии и Исландии и радар некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсё. Для регистрации искусственного радиоизлучения ионосферы использовались приёмник и спектроанализатор, расположенные в непосредственной близости от КВ нагревного комплекса.

На рис. 1 показана карта-схема, поясняющая геометрию расположения нагревного стенда EISCAT/Heating, а также диагностических средств наблюдений, использованных в экспериментах.

Исследование тонкой пространственной структуры искусственно возмущённой области ионосферы проводилось при распространении мощного КВ радиоизлучения О-поляризации в вертикальном (угол возвышения 90°) направлении и в направлении магнитного зенита (угол возвышения 78°) циклами, состоящими из периода нагрева с длительностью 10 мин и паузы с длительностью 5 мин. В каждом цикле нагрева осуществлялось изменение направления распространения мощного КВ радиоизлучения. В этих экспериментах радар некогерентного рассеяния радиоволн работал в режиме последовательного сканирования искусственно возмущённой области ионосферы в диапазоне углов возвышения от 92° до 74° с шагом 2° . Таким образом, в течение каждого 10-минутного периода излучения мощной радиоволны радар некогерентного рассеяния сканировал искусственно возмущённую область в интервале углов возвышения от 92° до 74° . При каждом значении угла возвышения измерения проводились в течение 1 минуты.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Возбуждение мелкомасштабных неоднородностей при нагреве ионосферной плазмы мощным КВ радиоизлучением необыкновенной поляризации (Х-мода)

Интенсивное мелкомасштабное расслоение ионосферной плазмы на сильно вытянутые вдоль магнитного поля неоднородности электронной концентрации было обнаружено уже в первых экспериментах по модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением [9]. Возбуждение мелкомасштабных неоднородностей во всех ранее выполненных экспериментах на КВ нагревных комплексах, таких, как «Сура», «Аресибо», EISCAT/Heating, HAARP, SPEAR, расположенных в средних и высоких широтах (см., например, [10–19]), наблюдалось в области верхнегибридного резонанса при отражении мощного КВ радиоизлучения обыкновенной поляризации (О-мода) от ионосферы либо на частотах нагрева несколько выше критической частоты f_{oF_2} , когда частота обыкновенной волны примерно равна верхнегибридной частоте в максимуме слоя F_2 : $f_H = (f_{oF_2}^2 + f_{ce}^2)^{1/2}$, где f_{ce} — гирочастота электронов. Как отмечалось, возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей за счёт тепловой (резонансной) неустойчивости при нагреве ионосферы мощным КВ радиоизлучением необыкновенной поляризации (Х-мода) невозможно, т. к. необыкновенная волна всегда отражается от области, расположенной ниже резонансной.

В экспериментах, выполненных в ААНИИ на нагревном комплексе EISCAT/Heating в ноябре 2009 года и марте 2010 года, впервые было обнаружено возбуждение интенсивных мелкомасштабных неоднородностей при нагреве F -области ионосферы мощным КВ радиоизлучением необыкновенной поляризации. Возбуждение неоднородностей наблюдалось в экспериментах 3, 4, 5 и 6 ноября 2009 года, а также 5, 6 и 8 марта 2010 года по данным наблюдений как с помощью радара CUTLASS в Финляндии, так и методом ракурсного рассеяния на трассе Лондон—Тромсё—Санкт-Петербург.

На рис. 2 и 3 приведены результаты наблюдений с помощью радара CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия) на частоте приблизительно 10 МГц в период нагревных экспериментов в Тромсё 5 ноября 2009 года с 14:00 до 15:30 UT и 6 ноября 2009 года с 14:00 до 15:20 UT соответственно, что позволило исследовать поведение искусственных ионосферных неоднородностей с пространственными масштабами $l_{\perp} \approx 15$ м ($l_{\perp} = \lambda/2$, где λ — длина волны излучения радара). В ноябрьских экспериментах разрешение по дальности (т. е. «ворота») составляло 45 км, при этом первые «ворота» начинались с дальности 180 км. Регистрация рассеянных на искусственных ионосферных неоднородностях сигналов проводилась в диапазоне дальностей от 765 до 1215 км, соответствующем «воротам» с номерами от 13 до 23.

На рис. 2а и 3а показана зависимость мощности рассеянных сигналов от времени для фиксированного расстояния 945 км от Ханкасалми до центральной части искусственно возмущённой области ионосферы над Тромсё (см. рис. 1), соответствующей «воротам» с номером 17. На рис. 2б и 3б показано распределение мощности рассеянных сигналов в зависимости от номера «ворот» и мирового времени. Нагрев ионосферы проводился на частоте 4040 кГц циклами, состоящими из 10 минутного периода нагрева и 5 минутной паузы. В первых трёх циклах нагрева мощное КВ радиоизлучение О-поляризации направлялось в магнитный зенит. Как видно из рис. 2, достаточно интенсивные сигналы, рассеянные на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях, наблюдались в первых двух циклах нагрева, когда критические частоты слоя F_2 для обыкновенных волн f_{oF_2} уменьшились с 4,0 до 3,7 МГц. Затем происходит дальнейшее уменьшение критических частот, и когда значение f_{oF_2} достигает 3,5 МГц мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности исчезают (см. рис. 2, последний цикл нагрева

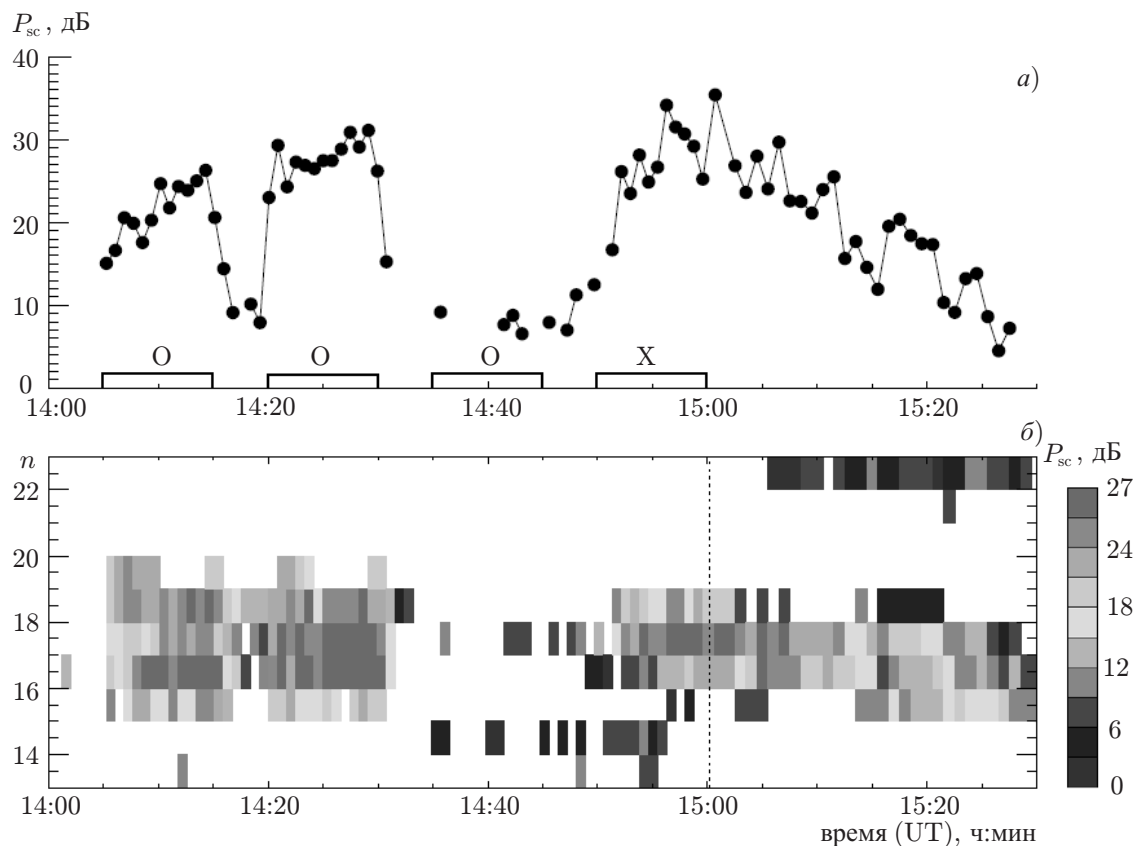


Рис. 2. Данные наблюдений с помощью когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия (луч 5, ориентированный на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсё), на частоте приблизительно 10 МГц в период эксперимента на нагревном комплексе EISCAT/Heating 5 ноября 2009 года с 14:00 до 15:30 UT. На рис. 2а показана зависимость мощности рассеянных сигналов P_{sc} от времени для фиксированного расстояния 945 км от Ханкасалми до центральной части искусственно возмущенной области ионосферы над Тромсё, соответствующего «воротам» номер 17. На рис. 2б приведено распределение мощности рассеянных сигналов в зависимости от номера «ворот» и времени. Регистрация рассеянных сигналов проводилась в диапазоне дальностей от 765 до 1215 км, что соответствовало «воротам» с номерами от 13 до 23. Циклы нагрева и используемая поляризация мощного КВ радиоизлучения отмечены на рис. 2а на оси времени

излучением О-поляризации с 14:35 по 14:45 UT). В следующем нагревном цикле (14:50–15:00 UT), когда значения f_{oF_2} составляли уже $3,3 \div 3,4$ МГц, была изменена поляризация мощного КВ радиоизлучения с О- на Х-моду. Изменение поляризации привело к возникновению интенсивных сигналов, рассеянных на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях. Аналогичная ситуация наблюдалась и в эксперименте 6 ноября 2009 года (см. рис. 3). Однако в этом эксперименте критические частоты начали уменьшаться раньше. Цикл 13:46–13:56 UT был последним циклом нагрева на О-моду, в котором регистрировались сигналы, рассеянные на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях. В двух последующих циклах (14:01–14:11 и 14:16–14:26 UT), когда значения f_{oF_2} упали ниже 3,5 МГц, указанные неоднородности не регистрировались совсем. Изменение поляризации на Х-моду (цикл 14:31–14:41 UT), аналогично событию 5 ноября, привело к появлению интенсивных сигналов, рассеянных на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях. Следует отметить, что 6 ноября 2009 года в циклах нагрева использовалось ступенчатое изменение мощности по схеме: 20 %,

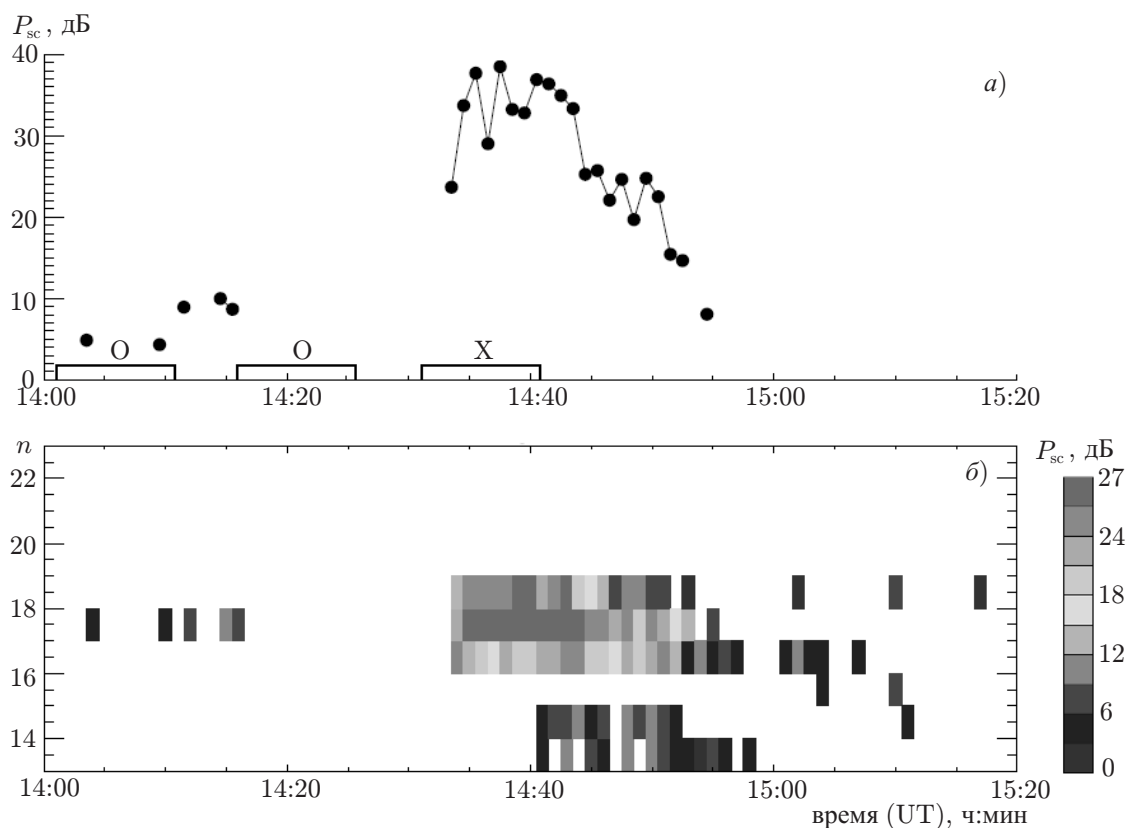


Рис. 3. Данные наблюдений с помощью когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия (луч 5, ориентированный на искусственно возмущённую область ионосферы над Тромсё) на частоте порядка 10 МГц в период эксперимента на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating 6 ноября 2009 года с 14:00 до 15:20 UT. На рис. 3а показано поведение мощности рассеянных сигналов от времени для фиксированного расстояния 945 км из Ханкасалми до центральной части искусственно возмущённой области ионосферы над Тромсё, соответствующей «воротам» номер 17. На рис. 3б приведено поведение мощности рассеянных сигналов в координатах дальность—мировое время UT. Регистрация рассеянных сигналов проводилась в диапазоне дальностей от 765 до 1215 км, соответствующем «воротам» с номерами от 13 до 23. Циклы нагрева и используемая поляризация мощного КВ радиоизлучения отмечены на рис. 3а на оси времени. В циклах нагрева использовалось ступенчатое изменение мощности по схеме: 20 %, 50 %, 70 %, 85 %, 100 %, 100 %, 85 %, 70 %, 50 %, 20 % (1 минута при каждом уровне мощности)

50 %, 70 %, 85 %, 100 %, 100 %, 85 %, 70 %, 50 %, 20 % (1 минута при каждом уровне мощности). Как видно из рис. 3, рассеянные сигналы появились не сразу после начала нагрева, а спустя 1,5÷2 мин, т. е. при 50-процентном уровне мощности. Тем не менее уменьшение мощности во второй половине интервала времени нагрева никак не сказалось на интенсивности рассеянных на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях сигналов.

5 и 6 марта 2010 года нагрев F -области ионосферы на X -моду проводился на частоте 4912,8 кГц, а 8 марта 2010 года — на частоте 5423 кГц. В этих экспериментах измерения с помощью радаров CUTLASS осуществлялись одновременно на трёх частотах, что позволило исследовать поведение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с различными пространственными масштабами. В мартовских экспериментах разрешение по дальности составляло 15 км (вместо 45 км в ноябре 2009 года), при этом первые «ворота» начинались с дальности 480 км. Регистрация рассеянных на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднород-

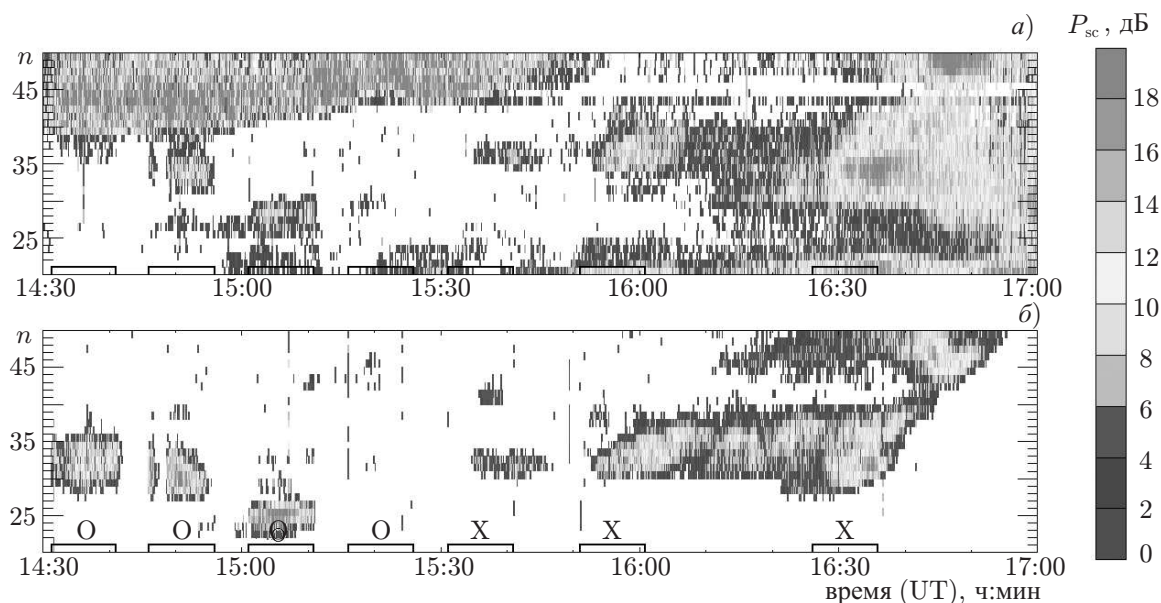


Рис. 4. Данные наблюдений с помощью когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия (луч 5, ориентированный на искусственно возмущённую область ионосферы над Тромсё), на частотах порядка 10 МГц (а) и 13 МГц (б) в период эксперимента на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating 5 ноября 2010 года с 14:30 до 17:00 UT. Приведено поведение мощности рассеянных сигналов в координатах дальность—мировое время (UT). Регистрация рассеянных сигналов проводилась в диапазоне дальностей от 780 до 1230 км, соответствующем «воротам» с номерами от 20 до 50. Циклы нагрева и используемая поляризация мощного КВ радиоизлучения отмечены на оси времени

ностях сигналов проводилась в диапазоне дальностей от 780 до 1230 км, соответствующем «воротам» с номерами от 20 до 50. На рис. 4 приведены результаты наблюдений с помощью радара CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия) на частотах порядка 10 и 13 МГц в период эксперимента в г. Тромсё 5 марта 2010 года с 14:30 до 17:00 UT, что позволило исследовать поведение указанных неоднородностей с пространственными масштабами $l_{\perp} \approx 15$ и 12 м. В первых четырёх циклах нагрева мощное КВ радиоизлучение О-поляризации направлялось в магнитный зенит. Как видно из рис. 4, рассеянные на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях сигналы наблюдались в первых трёх циклах нагрева, когда критические частоты слоя F_2 стали уменьшаться с 5,0 до 4,6 МГц. Затем происходит дальнейшее уменьшение критических частот, и когда значение f_{oF_2} достигает 4,4 МГц, мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности исчезают (см. последний цикл нагрева на О-моду с 15:16 по 15:26 UT). В следующем нагревном цикле с 15:31 по 15:41 UT, когда значения f_{oF_2} составляли уже примерно 4,2 МГц, была изменена поляризация мощного КВ радиоизлучения с О- на Х-моду. Изменение поляризации привело к возникновению рассеянных на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях сигналов. В следующем цикле нагрева на Х-моду (15:51–16:01 UT) интенсивность рассеянных сигналов возросла по сравнению с предыдущим циклом нагрева как на 10, так и на 13 МГц. Рассеянные сигналы регистрировались вплоть до следующего цикла нагрева (16:26–16:36 UT), в котором произошло их дальнейшее усиление. Аналогичное поведение рассеянных на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях сигналов при нагреве на Х-моду поляризации наблюдалось 6 и 8 марта 2010 года, но этих экспериментах возбуждались неоднородности трёх пространственных масштабов ($l_{\perp} \approx 8$; 12 и 15 м).

Анализ всего объёма экспериментальных данных показал, что возбуждение интенсивных мел-

комасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при нагреве на X-моде происходило, когда по данным ионозонда в Тромсё критические частоты обыкновенной волны были на $0,6 \div 0,8$ МГц ниже частоты нагрева, т. е. $f_H - f_{oF_2} \approx 0,6 \div 0,8$ МГц. В то же время значения критической частоты необыкновенной волны f_{xF_2} имели значения, близкие по величине к частоте нагрева, т. е. нагрев проводился вблизи критической частоты необыкновенной волны, так что f_H была примерно равна f_{xF_2} . Высота отражения мощного КВ радиоизлучения X-поляризации составляла величину порядка 220 км.

Суммируя особенности поведения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при нагреве F-области высокоширотной ионосферы мощным КВ радиоизлучением необыкновенной поляризации (X-мода), можно отметить следующее. Указанные неоднородности появлялись через 1–3 мин и достигали максимальной интенсивности через 2–5 мин после начала нагрева. Их характерной особенностью являлось необычно большое время релаксации, достигающее 20–30 мин. При этом после прекращения излучения на X-моду наиболее длительная релаксация отмечалась в южной части искусственно возмущённой области. Следует отметить, что характер релаксации является одноступенчатым, с плавным уменьшением интенсивности рассеянных сигналов после окончания нагревного цикла. Одной из особенностей поведения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, обнаруженных в экспериментах марта 2010 года, является их вынос из искусственно возмущённой области, который происходил как в южном, так и северном направлениях. По данным радара CUTLASS в Финляндии пространственный размер области, в которой возбуждались указанные неоднородности, составлял в различных экспериментах порядка 60–120 км. Отметим, что размер искусственно возмущённой области ионосферы, определяемый шириной диаграммы направленности антенной системы КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating, на высотах 200–220 км составляет порядка 60 км. Учитывая времена развития и релаксации мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей в F-области высокоширотной ионосферы при нагреве ионосферы мощным КВ радиоизлучением X-поляризации, представляется возможным сделать предположение об их связи со сверхкрупномасштабными возмущениями концентрации плазмы с пространственными масштабами порядка размера искусственно возмущённой области. Выполненные исследования [20] показали, что сверхкрупномасштабные неоднородности могут создаваться в ионосфере как при нагреве ионосферы волнами O-поляризации, так и волнами X-поляризации.

Представляет интерес рассмотреть поведение температуры электронов и концентрации плазмы на различных высотах при нагреве ионосферы волнами X-поляризации. На рис. 5 приведено поведение температуры электронов T_e на различных высотах по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсё, полученных 6 ноября 2009 года с 14:01 до 14:45 UT (рис. 5а) и 6 марта 2010 года с 15:38 до 17:00 UT (рис. 5б). На этих рисунках для сравнения приведены вариации T_e во время нагрева ионосферы мощными радиоволнами O-поляризации (цикл нагрева с 14:16 до 14:26 UT 6 ноября 2009 года и с 15:41 до 15:51 UT 6 марта 2010 года), когда частота нагрева превышала значения f_{oF_2} на величину порядка 0,7 МГц. Из рис. 5 ясно видно, что на высотах 200–250 км в нагревных циклах наблюдалось повышение температуры электронов, т. е. омический нагрев. При этом возмущения T_e при нагреве излучением X-поляризации были выше, чем при использовании O-поляризации, и достигали 50 % от невозмущённого уровня T_e непосредственно перед началом нагревного цикла. Так, например, 6 ноября 2009 года в цикле нагрева ионосферы мощной радиоволной X-поляризации с 14:31 до 14:41 UT (см. рис. 5а) на высоте 200 км наблюдалось увеличение T_e с 1000 до 1500 К, а при нагреве ионосферы излучением O-поляризации (цикл 14:01–14:11 UT) значения T_e повышались только с 1200 до 1400 К.

На рис. 6 приведены высотные профили температуры электронов $T_e(h)$ и электронной концентрации $N_e(h)$, построенные по данным радара некогерентного рассеяния 6 марта 2010 года

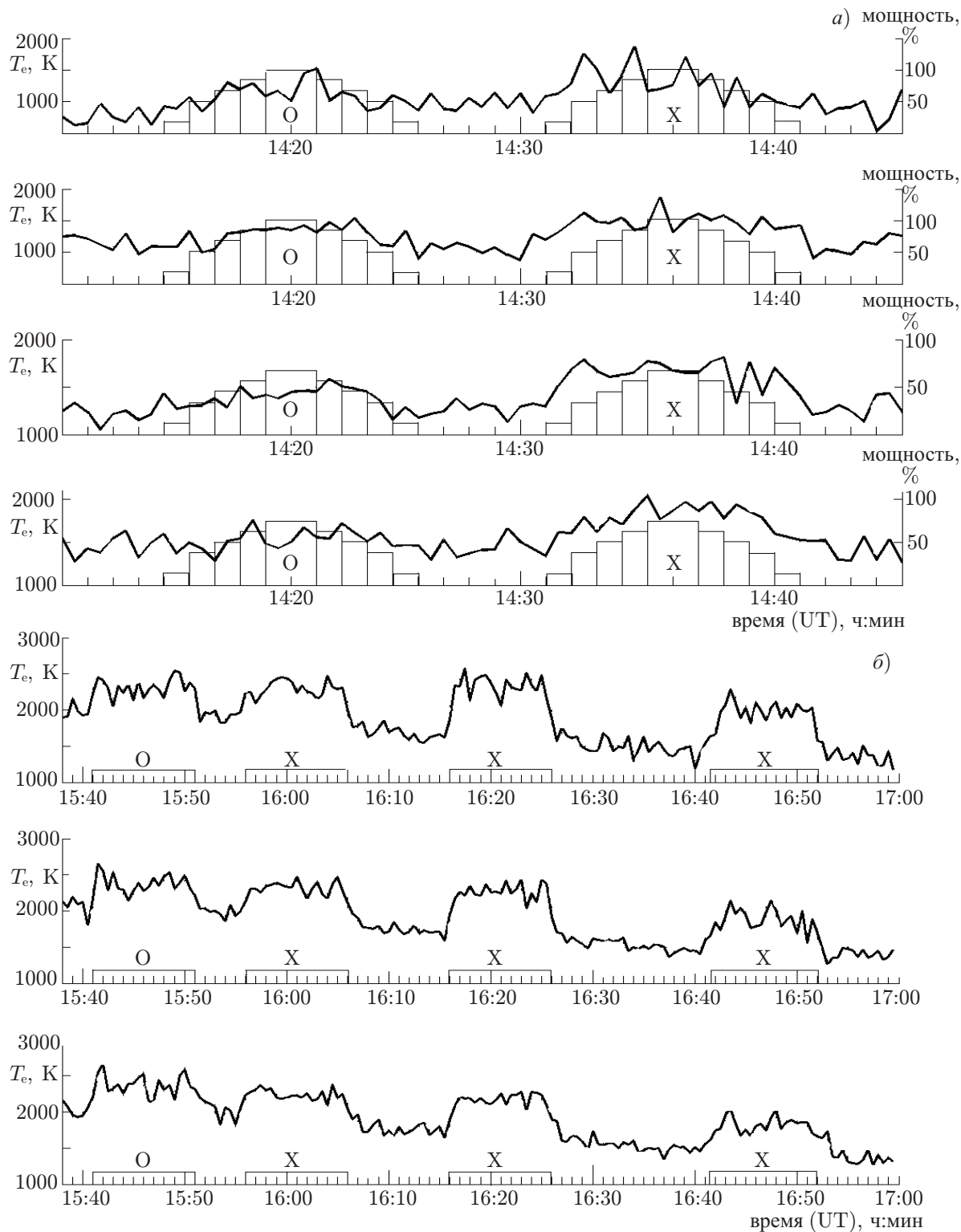


Рис. 5. Временные вариации температуры электронов T_e на различных высотах по данным измерений СВЧ радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсё: (а) 6 ноября 2009 года с 14:01 до 14:45 UT на высотах (сверху вниз) 186, 200, 214 и 247 км; (б) 6 марта 2010 года с 15:38 до 17:00 UT на высотах (сверху вниз) 214, 230 и 246 км. Циклы нагрева и используемая поляризация мощного КВ радиоизлучения отмечены на оси времени

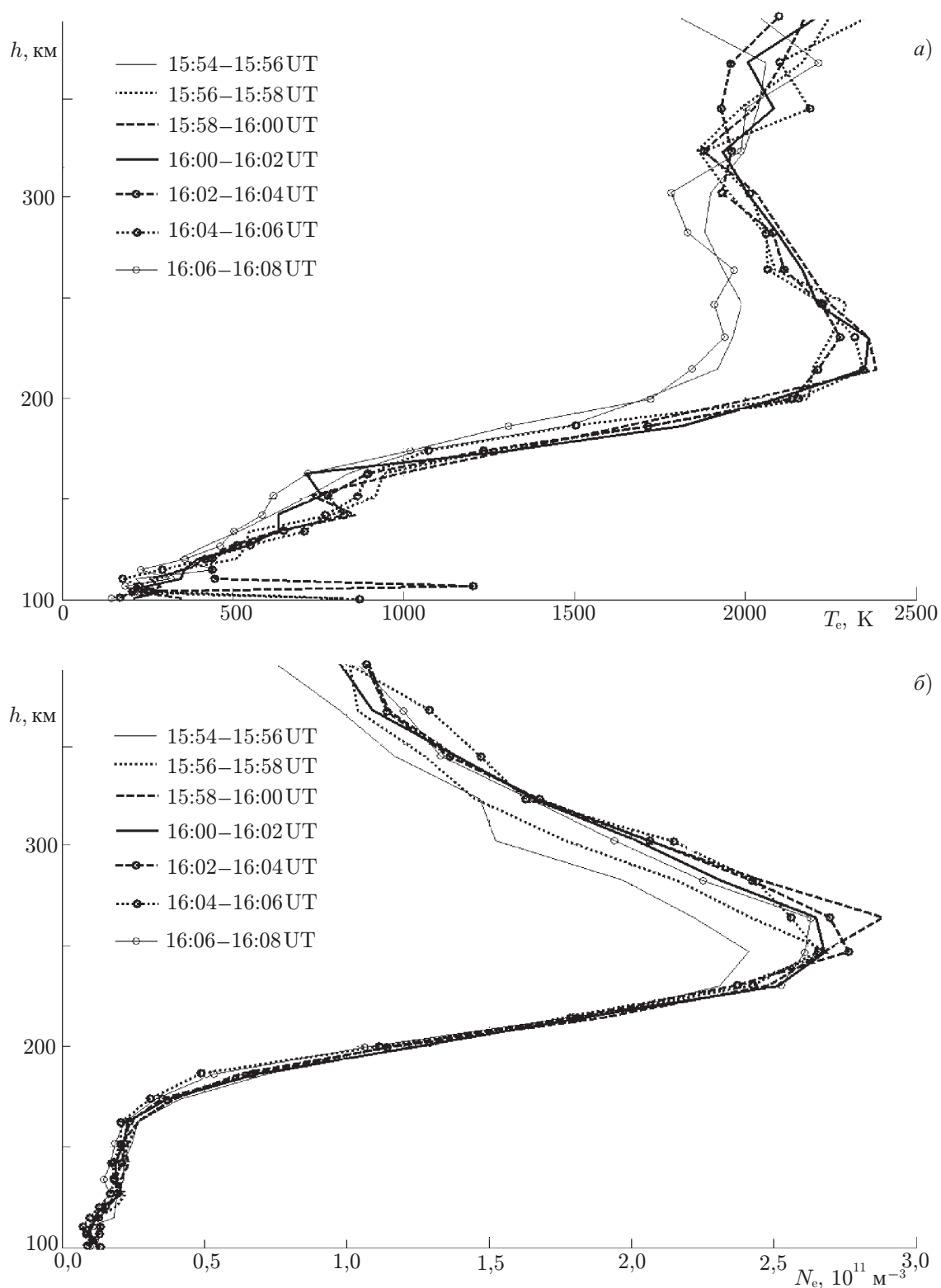


Рис. 6. Высотные профили температуры электронов $T_e(h)$ (а) и электронной концентрации $N_e(h)$ (б) 6 марта 2010 года для различных временных интервалов в течение нагревного цикла 15:56–16:06 UT, а также за 2 мин до и 2 мин после него, построенные по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсё. Мощная короткая радиоволна Х-поляризации излучалась на частоте 4 912,8 кГц в магнитный зенит

для различных временных интервалов нагревного цикла 15:56–16:06 UT, а также для интервалов времени до и после нагрева ионосферы мощным КВ радиоизлучением Х-поляризации. Анализ данных, приведённых на рис. 6, показывает, что возмущения T_e наблюдались в диапазоне высот от 180 до 300 км. При этом максимальные возмущения T_e происходили вблизи уровня отражения мощного КВ радиоизлучения на высоте примерно 220 км. Неожиданным явился факт возрастания электронной концентрации в направлении магнитного поля на величину порядка 25 % в широком диапазоне высот от 230 до 400 км. Интересно отметить несовпадение высотного интервала, в котором наблюдалось увеличение T_e и N_e . Так, максимум T_e регистрировался вблизи уровня отражения мощного КВ радиоизлучения на высоте примерно 220 км, а максимальное возрастание N_e — на высоте, составляющей приблизительно 270 км, т. е. на 50 км выше максимума возмущения T_e . Кроме того, если после окончания нагрева (временной интервал 16:06–16:08 UT) значения T_e возвращались к невозмущённому уровню, то возмущения N_e сохранялись достаточно сильными. В настоящее время известно два основных механизма возрастания N_e при воздействии мощных радиоволн на ионосферу [21]: нарушение ионизационно-рекомбинационного баланса и стимулированная ионизация ускоренными электронами. Оценки, выполненные в [22] для условий нагревных экспериментов в Тромсё, показали, что вследствие нарушения ионизационно-рекомбинационного баланса значения N_e на высотах 210–230 км могут увеличиваться на 2,4–5,3 % относительно невозмущённого уровня. Таким образом, данный механизм не может объяснить наблюдаемые возрастания N_e на величину порядка 25 %. Наиболее вероятным механизмом возрастания N_e в эксперименте 6 марта 2010 года на высотах выше уровня отражения мощного КВ радиоизлучения является генерация потока ускоренных электронов в поле мощного КВ радиоизлучения Х-поляризации. Анализ данных радара некогерентного рассеяния радиоволн показал, что вблизи уровня отражения мощного КВ радиоизлучения в спектрах сигналов появляются так называемые усиленные нагревом ионные и плазменные линии, свидетельствующие о возбуждении сильной ленгмюровской турбулентности. Она вызывает генерацию потока электронов, ускоренных до энергий, способных вызвать повышение электронной концентрации в областях, лежащих выше уровня отражения мощного КВ радиоизлучения [1].

В заключение данного раздела отметим, что механизм возбуждения интенсивных мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при нагреве F -области высокоширотной ионосферы мощным КВ радиоизлучением Х-поляризации неясен и требует дальнейшего серьёзного изучения как экспериментально, так и теоретически. Однако уже сейчас можно отметить, что возбуждение таких неоднородностей требует особых условий нагрева, а именно нагрева на частоте $f_H \approx f_{x F_2}$. Столь необычно большие времена нарастания и релаксации мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, по-видимому, свидетельствуют об их тесной связи со сверхкрупномасштабными возмущениями концентрации плазмы, имеющими пространственные масштабы порядка размеров искусственно возмущённой области.

2.2. Пространственная структура искусственно возмущённой F -области ионосферы

Сведения о размере и пространственной структуре искусственно возмущённой области ионосферы являются чрезвычайно важными и необходимыми как для научных исследований, так и для планирования нагревных экспериментов в различных геофизических условиях. Её горизонтальный размер приблизительно оценивается шириной главного лепестка диаграммы направленности антенной системы КВ нагревного комплекса и зависит от высоты её расположения. Для КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating при работе всех 12-ти передатчиков формируется апертура шириной порядка 12–14° в зависимости от частоты мощного КВ радиоизлучения. В реальных условиях высокоширотной ионосферы размер искусственно возмущённой области су-

щественно зависит от угла между направлением распространения мощного КВ радиоизлучения и направлением магнитного поля Земли. В [18, 19] по данным радара некогерентного рассеяния в Тромсё исследовалась пространственная структура указанной области при различных углах излучения волны накачки (вертикальном, $\Theta = 90^\circ$, вдоль направления магнитного поля $\Theta = 78^\circ$ и промежуточном между ними направлении $\Theta = 84^\circ$) в эпоху максимума солнечной активности. Для каждого из этих трёх углов с помощью радара некогерентного рассеяния осуществлялось последовательное сканирование искусственно возмущённой F -области ионосферы в направлениях 84° , 90° и 78° . Было установлено, что при любом направлении излучения волны накачки наиболее сильные возмущения температуры электронов T_e наблюдались в направлении магнитного поля в Тромсё. Представляет несомненный интерес исследовать тонкую структуру искусственно возмущённой области при её сканировании с помощью радара некогерентного рассеяния с шагом по углам возвышения не 6° , как это было сделано в [18, 19], а существенно меньшим, что позволит существенно детализировать распределение её параметров в горизонтальном направлении.

Ниже рассмотрены результаты экспериментов по сканированию искусственно возмущённой области радаром некогерентного рассеяния с шагом 2° по углам возвышения, выполненных в Тромсё в октябре–ноябре 2009 года. Исследования тонкой структуры указанной области проводились как при нагреве высокоширотной F -области ионосферы мощным КВ радиоизлучением О-поляризации в вертикальном направлении ($\Theta = 90^\circ$), так и при нагреве в направлении магнитного зенита, когда антенна нагревного комплекса EISCAT/Heating была наклонена на 12° к югу от вертикали ($\Theta = 78^\circ$). Эксперименты по сканированию искусственно возмущённой области ионосферы выполнялись 29 и 31 октября, а также 5 ноября 2009 года. Мощная короткая радиоволна излучалась на одной из частот 4912,8; 4544 или 4040 кГц циклами: 10 мин нагрев / 5 мин пауза. Отношение частоты нагрева к критической частоте слоя F_2 f_H/f_{oF_2} менялось в пределах $0,9 \div 1,0$. Эффективная мощность излучения составляла $190 \div 250$ МВт в зависимости от частоты нагрева. Для каждого из двух фиксированных углов распространения мощного КВ радиоизлучения с помощью радара некогерентного рассеяния в течение 10-минутного цикла нагрева осуществлялось последовательное сканирование искусственно возмущённой F -области ионосферы в направлениях от 92° до 74° с шагом 2° . При каждом значении угла возвышения измерения проводились в течение 1 минуты.

В качестве примера на рис. 7 приведены данные измерений параметров ионосферной плазмы — электронной концентрации N_e и температуры электронов T_e — при сканировании искусственно возмущённой области в диапазоне углов от 92° до 74° с помощью радара некогерентного рассеяния 29 октября с 12:28 до 12:58 UT (рис. 7а) и 31 октября 2009 года с 12:12 до 12:42 UT (рис. 7б). Приведены данные, полученные на фиксированной высоте 200 км вблизи высоты отражения мощной короткой радиоволны от слоя F_2 . В анализируемый период времени 29 октября мощное КВ радиоизлучение имело частоту 4912,8 кГц и эмитировалось с 12:30 до 12:40 UT в вертикальном направлении ($\Theta = 90^\circ$), а с 12:45 до 12:55 UT — в направлении магнитного поля (магнитный зенит, $\Theta = 78^\circ$). 31 октября волна накачки на частоте 4544 кГц излучалась в вертикальном направлении ($\Theta = 90^\circ$) с 12:15 до 12:25 UT, а затем в направлении магнитного зенита ($\Theta = 78^\circ$) с 12:30 до 12:40 UT.

Анализ данных, приведённых на рис. 7, позволяет выделить следующие характерные особенности в распределении возмущений внутри искусственно возмущённой области при углах излучения мощного КВ радиоизлучения $\Theta = 90^\circ$ и 78° . Во-первых, максимальные возмущения T_e при нагреве в магнитный зенит ($T_{e\max} = 5400 \div 5700$ К) существенно больше по сравнению с вертикальным нагревом ($T_{e\max} = 3400 \div 3600$ К) при одних и тех же фоновых значениях T_{e0} в паузах между нагревными циклами порядка $1500 \div 1800$ К. Из рис. 7 также следует, что при вертикальном нагреве ($\Theta = 90^\circ$) максимальные возмущения температуры электронов T_e (см.

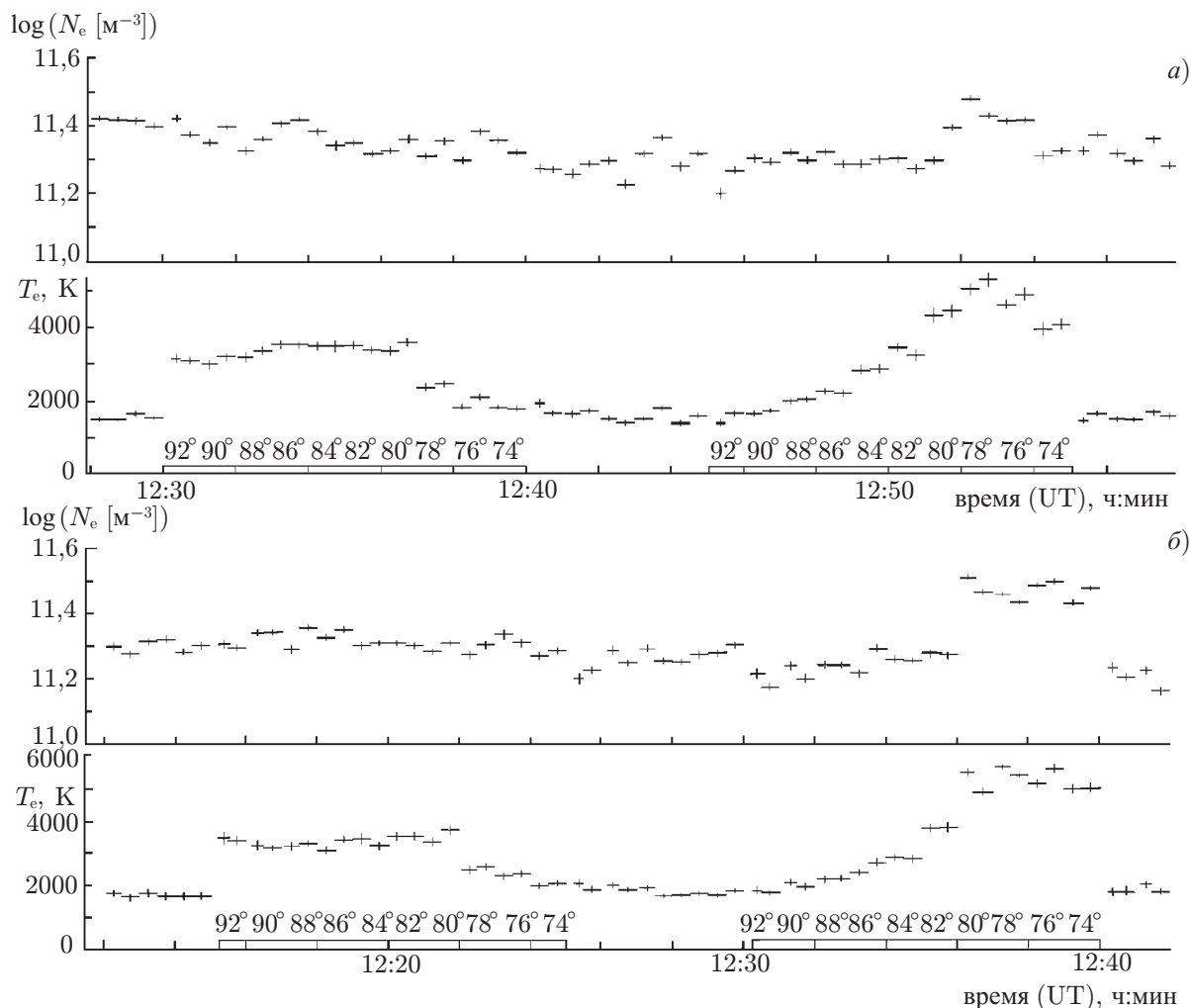


Рис. 7. Временные вариации электронной концентрации N_e и температуры электронов T_e на фиксированной высоте 200 км по данным измерений СВЧ радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсё в режиме последовательного сканирования искусственно возмущённой F -области ионосферы в направлениях от 92° до 74° с шагом 2°: (а) 29 октября 2009 года с 12:28 до 12:58 UT. Мощная короткая радиоволна О-поляризации с частотой 4 912,8 кГц излучалась с 12:30 до 12:40 UT в вертикальном направлении ($\Theta = 90^\circ$), а с 12:45 до 12:55 UT — в направлении магнитного поля (в магнитный зенит, $\Theta = 78^\circ$); (б) 31 октября 2009 года с 12:08 до 12:38 UT. Мощное КВ радиоизлучение О-поляризации эмитировалось на частоте 4 544 кГц в вертикальном направлении ($\Theta = 90^\circ$) с 12:15 до 12:25 UT, а затем в направлении магнитного зенита ($\Theta = 78^\circ$) с 12:30 до 12:40 UT

рис. 7б) равномерно распределены в широком диапазоне углов сканирования от 92° до 80°. При направлении распространения мощного КВ радиоизлучения вдоль магнитного поля ($\Theta = 78^\circ$) максимальные возмущения T_e сосредоточены в достаточно узком диапазоне углов сканирования от 80° до 74°. Столь сильное возрастание T_e в достаточно узком диапазоне углов при нагреве в направлении магнитного поля обусловлено эффектом магнитного зенита, являющегося результатом сильного нелинейного процесса структурирования плазмы и аномально сильного нагрева электронов. Теория эффекта магнитного зенита была развита для высокоширотной ионосферы в [1, 23]. Рассмотрение поведения вариаций электронной концентрации N_e по данным радара некогерентного рассеяния (см. рис. 7а) показывает, что при направлении мощного КВ радиоизлучения в магнитный зенит ($\Theta = 78^\circ$) в узком диапазоне углов от 80° до 74° имеет место

локальное возрастание электронной концентрации. В обсуждаемых условиях по данным измерений радаром некогерентного рассеяния в спектрах получаемых с него сигналов регистрировались усиленные нагревом ионные и плазменные линии, что является указанием на возбуждение сильной ленгмюровской турбулентности. В области сильной ленгмюровской турбулентности вблизи уровня отражения мощного КВ радиоизлучения происходит ускорение электронов до энергий, способных вызвать повышение степени ионизации плазмы [1, 22].

Анализ всего объёма экспериментальных данных, полученных в эпоху минимума солнечной активности при спокойных магнитных условиях, позволяет сделать следующее заключение о пространственной структуре искусственно возмущённой области ионосферы. При излучении волны накачки вертикально вверх ($\Theta = 90^\circ$) максимальные возмущения температур электронов достигали значений $T_{e\max} = 3\,200 \div 4\,000$ К при фоновых значениях в паузах между нагревными циклами $T_{e0} \approx 1\,200 \div 1\,800$ К. При этом максимальные возмущения T_e равномерно распределены внутри области с шириной $20^\circ \div 24^\circ$ (с учётом симметричности распределения T_e относительно направления $\Theta = 90^\circ$). Пространственный размер области с возмущением температуры электронов, превышающим фоновые значения на 50 %, т.е. области, где $T_e/T_{e0} = 1,5$, достигает больших размеров и составляет $24^\circ \div 32^\circ$. Таким образом, при вертикальном излучении волны накачки фактический пространственный размер искусственно возмущённой области (т.е. области, где происходит значительный разогрев ионосферной плазмы) по горизонтали существенно превышает размер области возмущения, определяемый шириной диаграммы направленности антенны $12^\circ \div 14^\circ$.

Совсем иная ситуация имеет место при направлении мощного КВ радиоизлучения в магнитный зенит ($\Theta = 78^\circ$). Здесь возмущения температур электронов достигали существенно более высоких значений $T_{e\max} = 4\,100 \div 5\,800$ К при тех же фоновых значениях $T_{e0} = 1\,200 \div 1\,800$ К. Однако в этих условиях наблюдалась сильная фокусировка искусственно возмущённой области и максимальные возмущения T_e были сосредоточены в узкой области шириной $6^\circ \div 8^\circ$, центрированной относительно направления магнитного поля. Пространственный размер искусственно возмущённой области, в которой возмущение температуры электронов на 50 % превышает фоновые значения, т.е. области, где $T_e/T_{e0} = 1,5$, достигал больших размеров и был соизмерим с шириной диаграммы направленности антенны КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating в Тромсё $12^\circ \div 14^\circ$.

2.3. Особенности возбуждения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей в F-области высокоширотной ионосферы при нагреве на частотах вблизи третьей гармоники гирочастоты электронов

Как известно, при определённых частотах мощной радиоволны f_H в ионосфере могут быть реализованы одновременно два резонансных эффекта. Первый — это обычный резонанс между f_H и верхнегибридной частотой f_{UH} . Второй резонанс — это резонанс с частотой, кратной частоте гиромагнитного вращения электронов: $f_H = n f_{ce}$. Таким образом, двойной резонанс возникает в тех областях ионосферы, где выполняется условие $f_H = n f_{ce} = f_{UH}$. Вблизи двойного резонанса происходят очень сильные изменения характеристик всех явлений, возникающих в области верхнегибридного резонанса при воздействии мощной волны на ионосферу: подавление генерации верхнегибридной плазменной турбулентности и уменьшение интенсивности мелкомасштабных ионосферных неоднородностей вплоть до их полного исчезновения, полная трансформация спектра искусственного радиоизлучения ионосферы и т.п. [1]. Общая ширина частотного диапазона, в котором наблюдаются существенные изменения эффектов модификации, составляет около $2 \div 3$ % от частоты резонанса $f_H = n f_{ce}$, т.е. $100 \div 200$ кГц [1]. Важно отметить сильную

Таблица 1. Времена прохождения частоты нагрева через третью гармонику гирорезонанса, значения частоты нагрева f_H и высоты её отражения h_{ref} от слоя F_2 ионосферы, а также значения критических частот f_{oF_2} для различных дней экспериментов, выполненных в марте 2009 года

Дата	Время, UT	f_H , кГц	h_{ref} , км	f_{oF_2} , кГц
6 марта 2009 года	12:40–12:42	4 100	185	4 200
7 марта 2009 года	13:12–13:14	4 100	185	4 500
9 марта 2009 года	13:12–13:14	4 100	185	4 500
10 марта 2009 года	14:00–14:02	4 100	185	4 400
11 марта 2009 года	16:20–16:30	4 040	220	4 070 ÷ 3 900

зависимость наблюдаемых явлений вблизи гирорезонанса от номера гирогармоники n . Проведённые к настоящему времени исследования различных характеристик плазменной турбулентности в высокоширотной ионосфере в зависимости от отстройки по частоте δf относительно частоты гирорезонанса, выполненные при различных номерах гармоник, являются недостаточно полными. Кроме того, отсутствуют экспериментальные данные о поведении мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей различных пространственных масштабов $l_{\perp}$ вблизи гирорезонанса.

В данном разделе приведены результаты исследования явлений в искусственно модифицированной высокоширотной ионосферной плазме в области двойного резонанса, когда частота нагрева близка к частоте третьей гармоники гирочастоты электронов, т.е. $f_H = 3f_{ce} = f_{UH}$. Эксперименты проводились в марте 2009 года на основе комплексного использования самых разнообразных современных средств диагностики, расположенных как непосредственно вблизи нагревного комплекса EISCAT/Heating (радар некогерентного рассеяния радиоволн, специальный приёмный комплекс для регистрации искусственного радиоизлучения ионосферы, ионозонд), так и дистанционных средств наблюдений, включая систему КВ радаров CUTLASS и многоканальный КВ доплеровский комплекс вблизи Санкт-Петербурга, работающий в режиме ракурсного рассеяния. Измерения параметров ионосферной плазмы с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн проводились в направлении магнитного поля Земли. В период экспериментов мощное КВ радиоизлучение О-поляризации направлялось вдоль магнитного поля циклами 2 мин нагрев / 2 мин пауза. Эффективная мощность излучения составляла 190 МВт. Режим работы КВ нагревного комплекса обеспечивал ступенчатое изменение частоты нагрева на $5 \div 10$ кГц в диапазоне частот от 3,9 до 4,2 МГц в каждом 2-минутном цикле нагрева, что обеспечило получение детальной информации о явлениях в ионосферной плазме как вблизи гирорезонанса, так и в диапазоне частот выше и ниже частоты третьей гармоники гирорезонанса, когда $f_H > 3f_{ce}$ и $f_H < 3f_{ce}$ соответственно. Измерения с помощью КВ радаров CUTLASS одновременно на трёх частотах 10; 13 и 17 МГц позволили исследовать поведение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей различных пространственных масштабов $l_{\perp} \approx 8; 12$ и 15 м ($l_{\perp} = \lambda/2$, где λ — длина волны излучения радара).

В табл. 1 приведены времена прохождения частоты нагрева через третью гармонику гирорезонанса, значения частоты нагрева и высоты её отражения от слоя F_2 ионосферы, а также значения критических частот для различных дней экспериментов, выполненных в марте 2009 года. Времена прохождения частоты нагрева через гирорезонанс идентифицировались по исчезновению так называемой компоненты DM (down-shifted maximum) в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы [24] в соответствии с методикой, изложенной в [25]. Контроль за характеристиками искусственного радиоизлучения ионосферы осуществлялся в непосредственной близости от КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating.

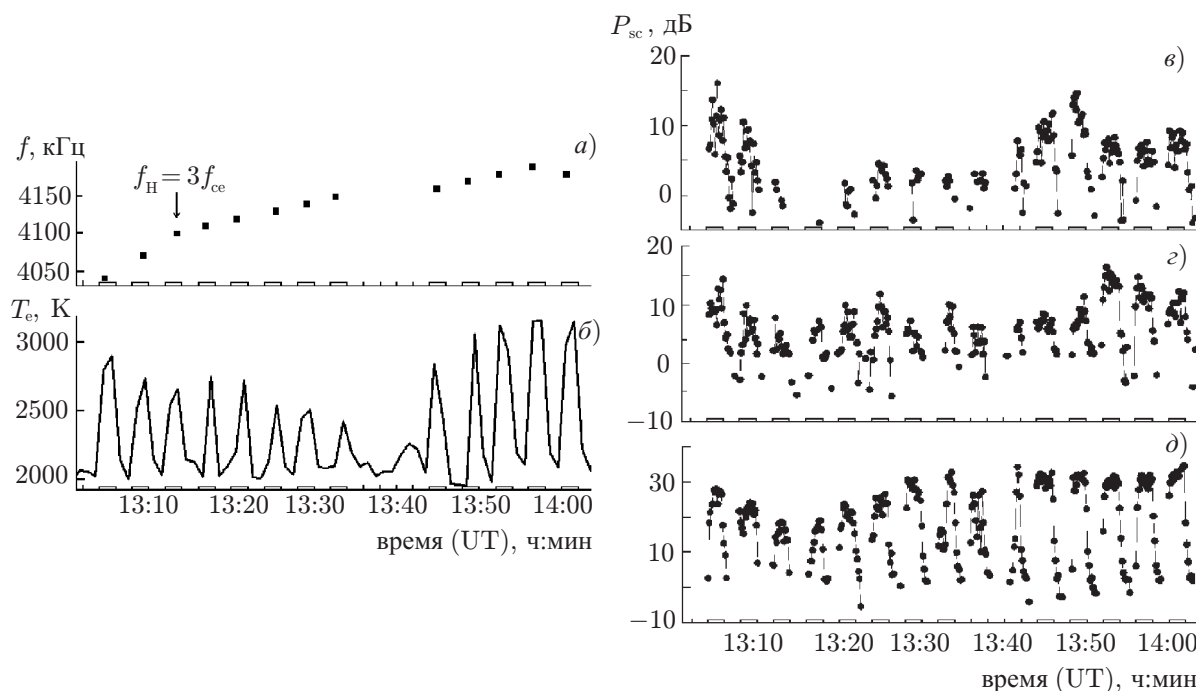


Рис. 8. Изменения частот нагрева (а), температуры электронов T_e (б) (по данным радара некогерентного рассеяния) и мощности рассеянных на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях сигналов на частотах порядка 10 МГц («ворота» 18), 13 МГц («ворота» 17) и 17 МГц («ворота» 16) (в, г, д) по данным измерений с помощью когерентного КВ радара CUTLASS (луч 5) в Ханкасалми (Финляндия) в период проведения эксперимента 9 марта 2009 года с 13:02 до 14:03 UT. Мощное КВ радиоизлучение О-поляризации направлялось в магнитный зенит циклами 2 мин нагрев / 2 мин пауза. Циклы нагрева отмечены на оси времени квадратными скобками. В цикле 13:36–13:38 UT нагрев не проводился, а в циклах 13:32–13:34 и 13:40–13:42 UT время настройки превышало 1 мин

В качестве типичного примера рассмотрим поведение параметров ионосферной плазмы при нагреве вблизи частоты третьей гармоники гирорезонанса 9 марта 2009 года. На рис. 8 показаны изменения частот нагрева и температуры электронов T_e по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн в направлении магнитного поля и мощности рассеянных на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях сигналов на частотах 10; 13 и 17 МГц по данным измерений с помощью радара CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия) в период проведения эксперимента 9 марта 2009 года с 13:02 до 14:03 UT. Времена эмиссии мощного КВ радиоизлучения отмечены на оси времени квадратными скобками. Спектры искусственного радиоизлучения ионосферы и соответствующие им по времени ионограммы вертикального зондирования в Тромсё для того же эксперимента 9 марта 2009 года приведены на рис. 9.

Отметим, что для всех рассмотренных случаев гирорезонанса на частотах нагрева, превышающих частоту третьей гармоники гирочастоты электронов, когда $f_H > 3f_{ce}$ на 20÷40 кГц, в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы наблюдалось возбуждение 2DM-компоненты, сопровождаемое усилением мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и возрастанием возмущённой температуры электронов T_e . Интенсивность указанных неоднородностей и возмущения T_e достигали максимальных значений на частотах на 50÷70 кГц выше $3f_{ce}$, где в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы наблюдается возбуждение компоненты широкой симметричной структуры (broad symmetrical structure). Интересная особенность была обнаружена в поведении мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей раз-

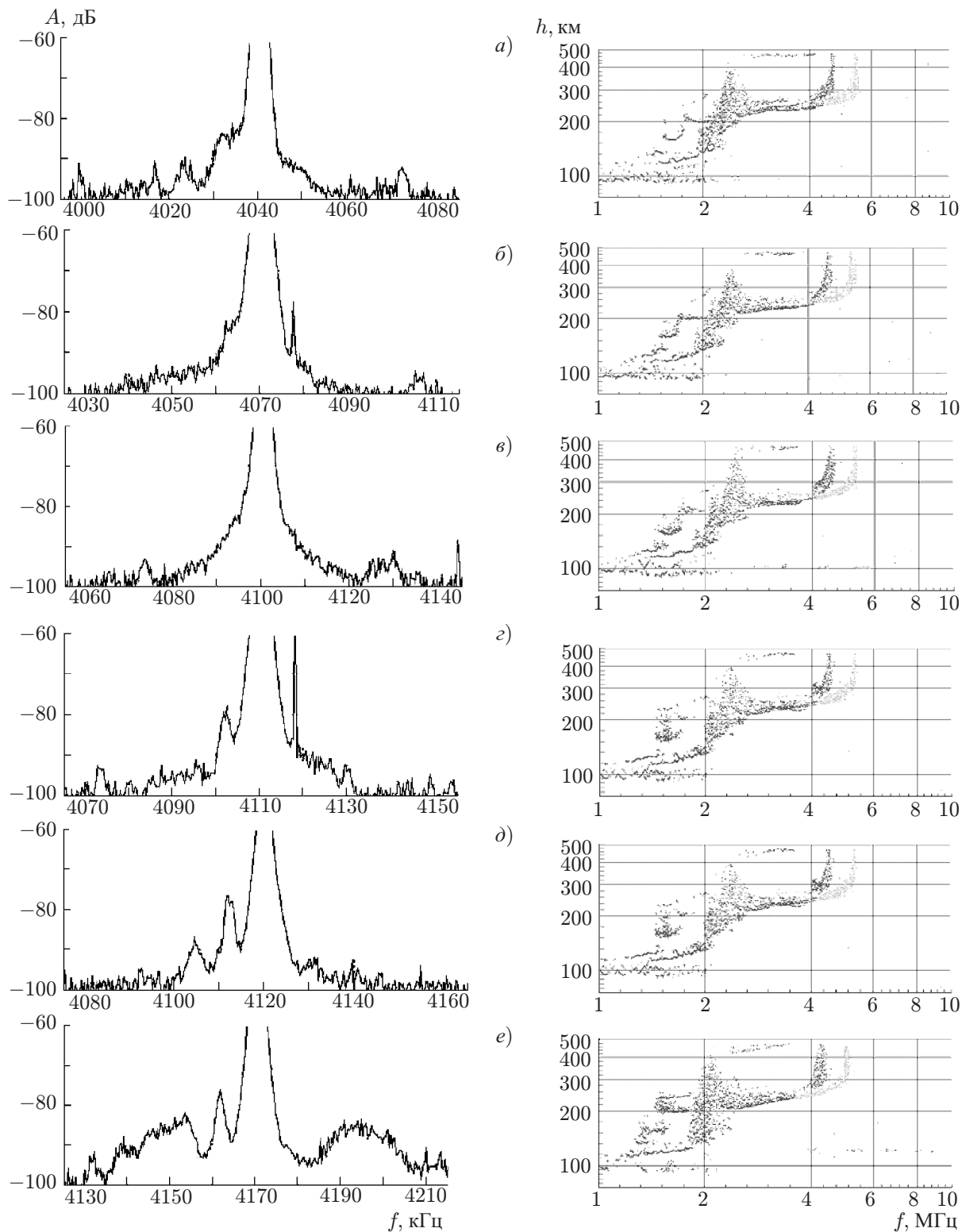


Рис. 9. Спектры искусственного радиоизлучения ионосферы и соответствующие им по времени ионограммы вертикального зондирования ионосферы, полученные в Тромсё 9 марта 2009 года при ступенчатом изменении частоты нагрева: (а) частота нагрева 4040 кГц, 13:04 UT, (б) — 4070 кГц, 13:08 UT, (в) — 4100 кГц, 13:12 UT, (г) — 4110 кГц, 13:16 UT, (д) — 4120 кГц, 13:20 UT, (е) — 4170 кГц, 13:48 UT

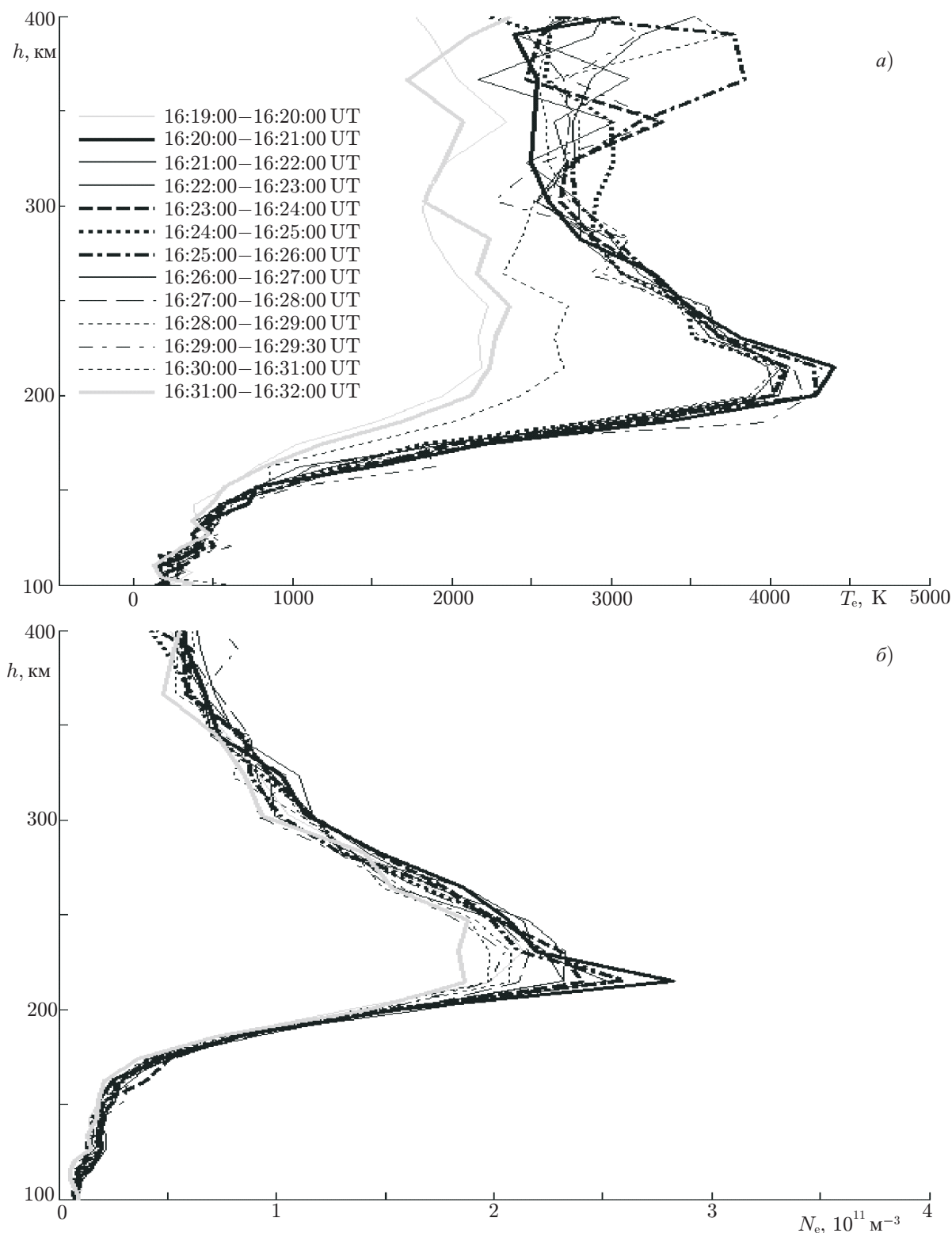


Рис. 10. Высотные профили температуры электронов $T_e(h)$ (а) и электронной концентрации $N_e(h)$ (б) 11 марта 2009 года для различных временных интервалов в течение нагревного цикла 16:20–16:30 UT, а также за 1 мин до и 2 мин после него, построенные по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсё. Мощная короткая радиоволна О-поляризации излучалась на частоте 4 040 кГц в магнитный зенит

личных масштабов в окрестности гирорезонанса. По данным измерений радара CUTLASS на трёх частотах было обнаружено, что указанные неоднородности с поперечными масштабами около 15 и 12 м подавляются значительно сильнее, чем с более мелкими масштабами порядка 8 м. Отметим, что возмущения температуры электронов T_e на гирорезонансе лишь незначительно (на $200 \div 300$ K) уменьшались по сравнению с возмущениями T_e в соседних циклах нагрева.

Выполненные комплексные эксперименты позволили обнаружить и детально исследовать явления в ионосферной плазме, инициированные воздействием мощного КВ радиоизлучения, в условиях, когда частота нагрева близка не только к третьей гармонике гирочастоты электронов, но и одновременно к критической частоте слоя F_2 , т. е. когда $f_H = f_{UH} = 3f_{ce} = f_{oF_2}$. Такие условия были реализованы в эксперименте 11 марта 2009 года в нагревном цикле с 16:20 до 16:30 UT.

На рис. 10 приведены высотные профили температуры электронов $T_e(h)$ и электронной концентрации $N_e(h)$, построенные по данным радара некогерентного рассеяния 11 марта 2009 года, для различных временных интервалов в пределах нагревного цикла 16:20–16:30 UT, а также для интервалов времени до и после нагрева. Анализ данных, приведённых на рис. 10, показывает, что в указанных выше специфических условиях проведения эксперимента, когда $f_H = f_{UH} = 3f_{ce} = f_{oF_2}$, наблюдалось экстремально сильное (до 4500 K) возрастание температуры электронов в широком диапазоне высот в течение всего 10-минутного цикла нагрева. Электронная концентрация в направлении магнитного поля по данным радара некогерентного рассеяния существенно (до 35 %) возрастала в течение первых $6 \div 7$ минут нагревного цикла, после чего происходило её постепенное уменьшение, которое продолжалось и после окончания 10-минутного цикла нагрева, что было обусловлено фоновым уменьшением электронной концентрации в вечерние часы. Интересно отметить, что по данным радара некогерентного рассеяния в рассматриваемом цикле нагрева в спектрах рассеянных сигналов регистрировались усиленные нагревом ионные линии, что является прямым указанием на возбуждение сильной ленгмюровской турбулентности. В этих условиях столь сильное возрастание электронной концентрации может быть обусловлено генерацией потока ускоренных электронов в области сильной ленгмюровской турбулентности вблизи уровня отражения мощного КВ радиоизлучения аналогично тому, что наблюдалось в [22].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным комплексных экспериментов по модификации высокоширотной ионосферы мощным КВ радиоизлучением, выполненных в марте, октябре–ноябре 2009 года и в марте 2010 года в эпоху глубокого минимума солнечной активности при спокойных магнитных условиях с использованием технических средств Европейской научной ассоциацией EISCAT, получены следующие основные результаты.

Впервые обнаружено возбуждение интенсивных мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей в F -области ионосферы при распространении мощного КВ радиоизлучения необыкновенной поляризации (X-мода) в направлении магнитного поля Земли на частотах нагрева вблизи критической частоты необыкновенной волны, т. е. когда $f_H \approx f_{XF_2}$. Указанные неоднородности появляются через $1 \div 3$ мин и достигают максимальной интенсивности через $2 \div 6$ мин после начала нагрева. Характерной особенностью мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых при нагреве мощным КВ радиоизлучением с X-поляризацией, является необычно большое время релаксации, достигающее $20 \div 30$ мин. Столь необычно большие времена нарастания и релаксации указанных неоднородностей, по-видимому, свидетельствуют об их тесной связи со сверхкрупномасштабными возмущениями концентрации плазмы с пространственными масштабами порядка размеров искусственно возбуждаемой области. Возбуждение

мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей сопровождалось повышением температуры электронов (омический нагрев). При этом возмущения T_e при нагреве на X-моду были выше, чем при O-поляризации и достигали 50 % от невозмущенного уровня T_e непосредственно перед началом нагревного цикла. Механизм возбуждения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при нагреве на X-моду не ясен и требует серьезного изучения как экспериментально, так и теоретически. Однако уже сейчас можно отметить, что возбуждение таких неоднородностей требует особых условий нагрева, а именно нагрева на частоте в окрестности f_{xF_2} .

Исследована пространственная структура распределения возмущений температуры электронов в искусственно возмущенной области ионосферы. Показано, что ее размеры существенно зависят от угла между направлением распространения мощной радиоволны и магнитным полем Земли. При излучении волны накачки вертикально вверх ($\Theta = 90^\circ$) максимальные возмущения температуры электронов $T_{e\max} = 3\,200 \div 4\,000$ К равномерно распределены внутри области с шириной $20^\circ \div 24^\circ$. Пространственный размер области с возмущениями температуры электронов, превышающих фоновые значения на 50 %, т. е. области, где $T_e/T_{e0} = 1,5$, достигает больших размеров и составляет $24^\circ \div 32^\circ$, что существенно превышает размер области возмущения, определяемый шириной диаграммы направленности антенны $12^\circ \div 14^\circ$. При распространении мощного КВ радиоизлучения в направлении магнитного зенита ($\Theta = 78^\circ$) возмущения температуры электронов достигали существенно более высоких значений $T_{e\max} = 4\,100 \div 5\,800$ К. Однако в этих условиях максимальные возмущения T_e сосредоточены в узкой области с шириной $6^\circ \div 8^\circ$, центрированной относительно направления магнитного поля в Тромсё. Пространственный размер искусственно возмущенной области, в котором возмущения температуры электронов на 50 % превышают фоновые значения, достигает больших размеров и соизмерим с шириной диаграммы направленности антенны КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating в Тромсё $12^\circ \div 14^\circ$.

Рассмотрены явления, происходящие в искусственно модифицированной F-области ионосферы при нагреве на частотах вблизи частоты третьей гармоники гирочастоты электронов, т. е. когда $f_H = 3f_{ce} = f_{UH}$. По данным комплексных измерений установлено:

1) мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности с более крупными поперечными масштабами $l_\perp \approx 15$ и 12 м подавляются в гирорезонансе значительно сильнее, чем с более мелкими масштабами $l_\perp \approx 8$ м;

2) вблизи гирорезонанса происходит незначительное уменьшение температуры электронов T_e на $200 \div 300$ К;

3) на частотах нагрева, превышающих частоту третьей гармоники гирочастоты электронов на $20 \div 40$ кГц, отмечалось возбуждение 2DM-компоненты в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы, сопровождаемое усилением мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и повышением T_e ;

4) в диапазоне частот нагрева, превышающих частоту третьей гармоники гирочастоты электронов на $50 \div 70$ кГц, регистрировалась генерация BSS-компоненты в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы, а интенсивность мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и возмущения температуры электронов достигали максимума;

5) в специфических условиях, возникающих при нагреве на частотах, близких не только к частоте третьей гармоники гирочастоты электронов, но и одновременно к критической частоте слоя F_2 , т. е. когда $f_H = f_{UH} = 3f_{ce} = f_{oF_2}$, наблюдалось экстремально сильное (до 4500 К) возращание температуры электронов в широком диапазоне высот, сопровождаемое существенным (до 35 %) локальным повышением электронной концентрации вдоль направления магнитного поля.

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. Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Геофизика» и РФФИ (грант 07–05–00167а), Т. Йоман поддержан Советом по науке и технологиям Великобритании (грант ST/H002480/1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
2. Благовещенская Н. Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. С.-Петербург: Гидрометеиздат, 2001.
3. Грач С. М., Караштин А. Н., Митяков Н. А. и др. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. С. 1330.
4. Васьков В. В., Гуревич А. В. // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. С. 176.
5. Das A. C., Fejer J. A. // J. Geophys. Res. A. 1979. V. 84. P. 6701.
6. Rietveld M. T., Kohl H., Kopka H., Stubbe P. // J. Atmos. Terr. Phys. 1993. V. 55. P. 577.
7. Greenwald R. A., Baker K. B., Dudeney J. R., et al. // Space Sci. Rev. 1995. V. 71. P. 761.
8. Rishbeth H., van Eyken T. // J. Atmos. Terr. Phys. 1993. V. 55. P. 525.
9. Thome G. D., Blood D. W. // Radio Sci. 1974. V. 9. P. 917.
10. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. С. 208.
11. Авдеев В. Б., Белей В. С., Беленов А. Ф. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37. С. 479.
12. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Meteleev S. A., et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59. P. 2317.
13. Noble S. T., Djuth F. T., Jost R. J., et al. // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 13613.
14. Blagoveshchenskaya N. F., Kornienko V. A., Petlenko A. V., et al. // Ann. Geophys. 1998. V. 16. P. 1212.
15. Blagoveshchenskaya N. F., Kornienko V. A., Brekke A., et al. // Radio Sci. 1999. V. 34. P. 715.
16. Coster A. J., Djuth F. T., Jost R. J., Gordon W. E. // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 2807.
17. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // J. Geophys. Res. A. 2003. V. 108, No. 4.
18. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kornienko V. A., et al. // Adv. Space Res. 2006. V. 38. P. 2503.
19. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kornienko V. A., et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2009. V. 71. P. 11.
20. Иванов В. А., Игнатъев Ю. А., Фролов В. А. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. С. 328.
21. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973.
22. Blagoveshchenskaya N. F., Carlson H. C., Kornienko V. A., et al. // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 131.
23. Gurevich A. V., Zybin K. P., Carlson H. C., Pedersen T. // Phys. Lett. A. 2002. V. 305. P. 264.
24. Leyser T. B. // Space Sci. Rev. 2001. V. 98, No. 3–4. P. 223.

25. Leyser T. B., Thide B., Waldenvik M., et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 19 555.

Поступила в редакцию 23 апреля 2010 г.; принята в печать 24 октября 2010 г.

**THE EFFECTS OF MODIFICATION OF A HIGH-LATITUDE IONOSPHERE
BY HIGH-POWER HF RADIO WAVES. PART 1. RESULTS
OF MULTI-INSTRUMENT GROUND-BASED OBSERVATIONS**

N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova, T. K. Yeoman, and M. T. Rietveld

We present the results of multi-instrument experiments related to studying the phenomena in the high-latitude ionosphere affected by high-power radio waves using the EISCAT technical facilities. It was found for the first time that strong small-scale artificial field-aligned irregularities (AFAIs) are excited when the ionospheric F region is heated by a high-power HF radio wave with X-mode polarization near the altitude at which the critical frequency f_{xF_2} of the F_2 layer is equal to the frequency f_H of the heating accompanied by an up to 50% increase in the electron temperature. The spatial structure of the artificially perturbed ionospheric F region is examined in detail using an incoherent scatter radar operated in the regime of scanning over elevation angles from 92° to 74° with a 2° step. It is shown that the spatial size of the heated patch strongly depends on the angle of the HF pumping relative to the Earth's magnetic field. The phenomena occurring in the artificially modified ionospheric F region heated at frequencies near the third electron gyroharmonic, i.e., at $f_H = 3f_{ce} = f_{UH}$, where f_{UH} is the upper-hybrid frequency, are explored on the basis of multi-instrument observation data.