

УДК 533.951+537.868

ЭФФЕКТЫ МОДИФИКАЦИИ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ КОРТКОВОЛНОВЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ НЕОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НАГРЕВНОГО КОМПЛЕКСА SPEAR

Т. Д. Борисова¹, Н. Ф. Благовещенская¹, А. С. Калишин¹, К. Оксавик²,
Л. Баделли², Т. К. Йоман³

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

² University Center in Svalbard, Longyearbyen, Norway

³ University of Leicester, Leicester, United Kingdom

Представлены результаты экспериментов по модификации слоя F_2 полярной ионосферы мощными короткими радиоволнами необыкновенной поляризации, выполненных в октябре 2010 года с использованием коротковолнового нагревного комплекса SPEAR (г. Лонгиер, арх. Шпицберген). Для диагностики эффектов воздействия мощных коротких радиоволн методом ракурсного рассеяния на сети диагностических трасс использовались коротковолновый доплеровский радар CUTLASS (Ханкасалми, Финляндия) и радар некогерентного рассеяния радиоволн ESR (г. Лонгиер). Обнаружено возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, ответственных за ракурсное и обратное рассеяние диагностических сигналов. Одновременные с нагревом измерения радаром некогерентного рассеяния ESR свидетельствуют об изменении параметров ионосферной плазмы: возрастания электронной концентрации на $10 \div 25$ % и температуры электронов на $10 \div 30$ % на высотах слоя F_2 и формировании спорадической ионизации на высотах $140 \div 180$ км (ниже максимума слоя F_2). Для объяснения эффектов при нагреве ионосферы радиоволнами необыкновенной поляризации предлагается гипотеза трансформации необыкновенных электромагнитных волн в обыкновенные в анизотропной плавно неоднородной ионосфере.

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие мощного коротковолнового радиоизлучения на ионосферу вызывает возбуждение искусственной ионосферной турбулентности различной природы [1]. К наиболее значимым источникам искусственной турбулентности в ионосферной плазме относятся параметрические (стрикционная и тепловая) неустойчивости. Данные неустойчивости вызывают генерацию интенсивных плазменных колебаний, повышение температуры электронов, возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (с поперечными масштабами $l_{\perp} < 30$ м) и искусственного радиоизлучения ионосферы, а также ускорение электронов фоновой плазмы до сверхтепловых скоростей, что, в свою очередь, приводит к искусственному оптическому излучению из возмущённой области ионосферы и искусственной ионизации плазмы. Тепловая параметрическая (резонансная) неустойчивость развивается при отражении мощного коротковолнового радиоизлучения обыкновенной поляризации (О-мода) от ионосферы на высотах вблизи уровня верхнегибридного резонанса, где $f_H = (f_o^2 + f_{ce}^2)^{1/2}$, f_H — частота нагрева, f_{UH} — верхнегибридная частота, f_{ce} — гирочастота электронов, f_o — локальная электронная частота плазмы [2, 3]. Области резонанса достигает только обыкновенная волна при вертикальном или близком к нему распространении. Необыкновенная волна всегда отражается от области, расположенной ниже резонансной, поэтому возбуждение мелкомасштабных ионосферных неоднородностей за счёт тепловой резонансной неустойчивости в этом случае невозможно.

Модификация ионосферы мощными короткими радиоволнами на высоких широтах, где в естественных условиях наблюдаются интенсивные горизонтальные и продольные токи, естественные неоднородности различных масштабов, потоки высыпающихся частиц, неустойчивости в плазме

и т. д., вызывает новые явления, принципиально невозможные на средних широтах [4]. С 2004 года эти явления исследовались с помощью нагревных экспериментов на комплексе SPEAR (Space Plasma Exploration by Active Radar), расположенном на архипелаге Шпицберген ($78,15^\circ$ с. ш., $16,05^\circ$ в. д., магнитное наклонение $I = 82^\circ$) [5]. В зависимости от фоновых геофизических условий и местного магнитного времени комплекс SPEAR может находиться либо на дневной стороне авроральной зоны, либо в полярной шапке (местное магнитное время МТ определяется значениями геомагнитной долготы станции λ' и геомагнитной долготы полудня в данный момент времени λ_C как $MT = (\lambda_C - \lambda') / (15 + 12)$). Результаты выполненных экспериментов продемонстрировали наличие в ионосферной плазме широкого комплекса явлений, вызванных развитием параметрических и резонансной неустойчивостей, см. например [5–7]. Отметим, что для полярной ионосферы характерна сильная изменчивость её параметров на сравнительно коротких интервалах времени даже при спокойных магнитных условиях.

В работах [8, 9] исследовались условия возникновения и характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при нагреве слоя F_2 высокоширотной ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением необыкновенной поляризации (X-мода) с использованием технических средств Европейской научной ассоциации EISCAT (г. Тромсё, Норвегия). Данные исследования показали, что при выполнении соотношений $f_H > f_{oF_2}$ и $f_H \leq f_{xF_2}$ (здесь f_{oF_2} и f_{xF_2} — критические частоты для обыкновенных и необыкновенных волн в слое F_2) имеет место генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с поперечными масштабами $l_\perp \approx 8 \div 15$ м. Генерация неоднородностей сопровождалась увеличением электронной концентрации N_e в слое F_2 (максимум на 30 %) и электронной температуры T_e (на 50 %) по сравнению с измерениями во время пауз в излучении нагревного стенда EISCAT/Heating (эффективная мощность излучения составляла порядка $180 \div 220$ МВт).

Возрастание температуры T_e на $300 \div 400$ К при модификации F -области высокоширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами необыкновенной поляризации нагревного стенда EISCAT/Heating наблюдалось в работе [10]. Эксперимент выполнялся в спокойных ночных условиях, когда частота нагрева f_H превышала частоту f_{oF_2} , и волна накачки не отражалась от ионосферы. Результаты численного моделирования показали возможность роста температуры T_e вследствие омического нагрева ионосферной плазмы волной накачки.

В данной работе представлены результаты экспериментов на высокоширотном нагревном комплексе SPEAR по модификации полярной ионосферы мощными короткими радиоволнами необыкновенной поляризации.

1. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Экспериментальные наблюдения по воздействию мощного коротковолнового радиоизлучения нагревного комплекса SPEAR на полярную ионосферу проводились в дневные часы (10:00–16:00 UT) с 28 сентября по 8 октября 2010 года.

Стенд работал на частотах $f_H = 4450, 4600$ и 4900 кГц, в режимах излучения волн обыкновенной (O) или необыкновенной (X) поляризации с максимальной эффективной мощностью $P_{эфф} = 15$ МВт. В основном нагрев проводился циклами с периодами 5 мин нагрев/5 мин пауза. Диаграмма направленности антенны была наклонена к югу на 8° , что обеспечивало излучение параллельно магнитному полю Земли в г. Лонгьер. Отметим, что в направлении магнитного зенита возникают наиболее сильные возмущения ионосферной плазмы — так называемый эффект магнитного зенита [1, 4, 11]. Для условий проведения экспериментов при излучении волны X-поляризации «просачивание» волны O-поляризации не превышало $15 \div 20$ %.

Диагностика явлений, инициированных воздействием мощных коротких радиоволн комплекса

Таблица 1. Пункты расположения радиопередатчиков, сигналы которых принимались на станции «Горьковская» в сентябре–октябре 2010 года

Радиопередатчик	Северная широта, град	Восточная долгота, град	$f_{\text{диагн}}$ или $f_{\text{Н}}$, кГц	Расстояние до обсерватории «Горьковская», км	Расстояние до стенда SPEAR, км	Общая дальность трассы ракурсного рассеяния, км
SPEAR, Лонгьер, Норвегия	78,15	16,05	4 450 4 600 4 900	2 020	—	—
Гринвил, США	35,28	–77,12	9 805 9 885 11 970	7 465	6 250	8 270
Окечобе, США	27,28	–80,56	13 695 15 410	8 400	7 190	9 210
Вандивер, США	33,30	–86,28	11 520	8 070	6 660	8 680
Рампишам, Англия	50,48	–2,38	11 820 11 955	2 265	3 165	5 185
Вертачтал, Франция	48,05	10,41	13 700 17 580	1 845	3 355	5 375
Хорби, Швеция	55,49	13,44	13 820 15 735	1 095	2 520	4 540
Ситкунай, Литва	55,02	23,48	9 710	705	2 585	4 605

SPEAR на полярную ионосферу, осуществлялась следующими методами и средствами:

1) Радар некогерентного рассеяния радиоволн ESR (EISCAT Svalbard Radar) с рабочей частотой 500 МГц, расположенный вблизи нагревного стенда SPEAR [5, 6]. Измерения параметров ионосферной плазмы (электронной концентрации N_e и температуры электронов T_e) проводились вдоль направления магнитного поля в Лонгиере (магнитный зенит).

2) Система коротковолновых радаров CUTLASS (SUPERDARN) в Финляндии и Исландии [12]; диаграммы направленности обоих радаров представляли собой узконаправленный луч с шириной $3,3^\circ$, ориентированный на искусственно возмущённую область ионосферы над Лонгиером (лучи 9 и 5 для радаров в Финляндии и Исландии соответственно).

3) Многоканальный приёмный коротковолновый доплеровский комплекс, предназначенный для регистрации нагревных коротковолновых сигналов стенда SPEAR и диагностических радиосигналов методом ракурсного рассеяния на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях. Комплекс установлен в обсерватории «Горьковская» Арктического и антарктического НИИ, расположенной в 70 км от г. С.-Петербург и на расстоянии порядка 2 000 км от комплекса SPEAR [4]. Диаграмма направленности приёмной антенны обсерватории «Горьковская» ориентирована на комплекс SPEAR. В качестве диагностических сигналов выбирались коротковолновые радиосигналы радиовещательных станций с относительной нестабильностью несущей частоты не хуже 10^{-8} . В табл. 1 представлены данные о диагностических передатчиках (географические координаты, рабочие частоты $f_{\text{диагн}}$, расстояния до обсерватории «Горьковская» и до стенда SPEAR, общая протяжённость трасс ракурсного рассеяния). Геометрия

экспериментов приведена на рис. 1.

Анализ и интерпретация результатов экспериментальных измерений выполнялись с учётом магнитных (магнитометр в г. Лонгиер) и ионосферных (ионозонд в г. Лонгиер) данных, характеризующих фоновую геофизическую обстановку, а также с привлечением измерений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на спутнике ACE.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В данном разделе представлены результаты исследований, выполненных в периоды модификации полярной ионосферы мощными короткими радиоволнами необыкновенной поляризации (Х-мода) нагревного стенда SPEAR 4, 7 и 8 октября 2010 года с 10:00 до 14:00 UT, когда одновременно работали стенд SPEAR и радар некогерентного рассеяния ESR.

Эксперимент выполнялся в период минимума солнечной активности при спокойных геомагнитных условиях. В табл. 2 приведены значения геофизических индексов, характеризующих солнечную и магнитную активности (число солнечных пятен W , его среднее значение за 3 дня \bar{W} , планетарный трёхчасовой магнитный индекс K_p , сумма K_p за сутки $\sum K_p$, магнитный индекс A_p , среднее значение индекса A_p за сутки \bar{A}_p , а также общие комментарии к данным вертикального зондирования ионосферы). Данные табл. 2 наглядно демонстрируют низкий уровень солнечной и магнитной активностей.

Анализ данных наземного магнитометра г. Лонгиер показал, что, несмотря на спокойные фоновые геомагнитные условия во все дни проведения эксперимента, в ночные часы с 0 до 6–8 UT наблюдались слабые бухтообразные возмущения в H -, D - и Z -компонентах магнитного поля Земли. Длительность возмущений составляла 1÷3 часа. Максимальные отклонения компонент от среднего значения в ночные часы составили:

$$H \sim -(5 \div 10) \text{ нТ}, D \approx 0,13 \text{ град}, Z \approx 1 \text{ нТ} \text{ 4 октября 2010 г.};$$

$$H \sim -(50 \div 60) \text{ нТ}, D \approx 0,35 \text{ град}, Z \approx 50 \text{ нТ} \text{ 7 октября 2010 г.};$$

$$H \sim -(50 \div 80) \text{ нТ}, D \approx 0,75 \text{ град}, Z \approx 200 \text{ нТ} \text{ 8 октября 2010 г.}$$

Станция вертикального зондирования ионосферы (ионозонд) в г. Лонгиер обеспечивала получение ионограмм 1 раз в 6 минут. В отдельные периоды работы нагревного стенда SPEAR результаты измерений вертикального зондирования отсутствовали в связи с техническими причинами или/и наличием аврорального поглощения (7 и 8 октября 2010 года). Анализ полного объёма полученных ионограмм показал сильную изменчивость высотных профилей электронной концентрации $N_e(h)$ в высокоширотной ионосфере не только для различных дней измерений, но и на коротких интервалах времени длительностью порядка 6÷15 мин. На рис. 2 в качестве примера изменчивости профилей $N_e(h)$ на коротких интервалах показаны ионограммы вертикального зондирования, последовательно измеренные 7 октября 2010 года в 09:48 UT (рис. 2а) и 09:54 UT

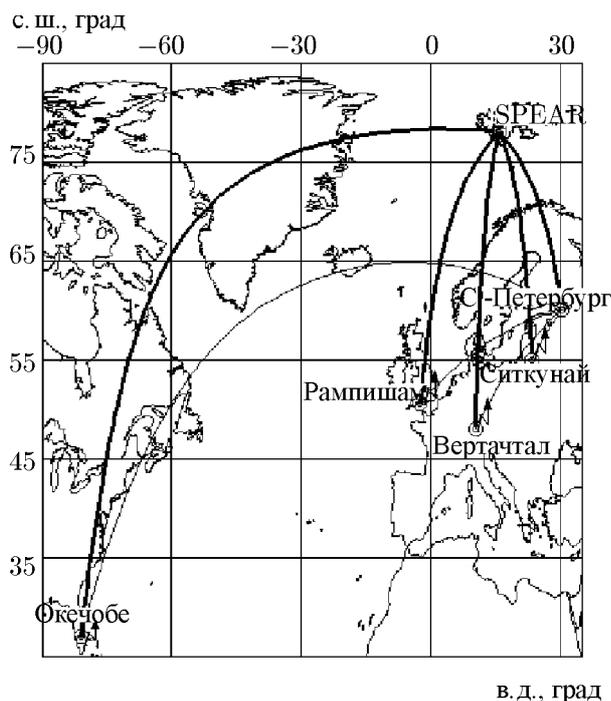


Рис. 1. Карта-схема, поясняющая геометрию расположения нагревного стенда SPEAR и диагностических трасс ракурсного рассеяния, использованных в экспериментах осенью 2010 года: тонкая линия соответствует трассе прямого распространения коротковолнового сигнала, толстые линии — трассам ракурсного рассеяния

Таблица 2. Вариации геофизических индексов и общие комментарии к данным вертикального зондирования в период нагревных экспериментов комплекса SPEAR с использованием излучения необыкновенной поляризации в октябре 2010 года. Здесь \bar{W} — усреднённое за три дня число солнечных пятен W , $\sum K_p$ — сумма за сутки планетарного трёхчасового магнитного индекса K_p , \bar{A}_p — среднее за сутки значение магнитного индекса A_p

Дата	W	\bar{W}	K_p	$\sum K_p$	A_p	\bar{A}_p	Явления аномального поглощения радиоволн по данным вертикального зондирования и уровень поглощения A , измеренный риометром Баренцбурга
04.10.2010	37	32	0	3–	0	3	—
07.10.2010	0	8	1–	6	3	5	10:00–12:18 UT; $A = 0,07 \div 0,12$ дБ
08.10.2010	0	0	1	9–	4	2	10:24–11:40 UT; $A = 0,05 \div 0,10$ дБ

(рис. 2б), непосредственно перед началом нагревного эксперимента в 10:00 UT.

Исследование показало, что в период проведения эксперимента в часы местного полдня (11:00–12:00 UT) диапазон критических частот f_{oF_2} ионосферного слоя F_2 составлял $4,2 \div 6,0$ МГц. В период 12:00–12:30 UT, как правило, происходило понижение частоты f_{oF_2} с последующим ростом около 13:00 UT. Данные вариации частоты f_{oF_2} объясняются влиянием высыпаний из области клефта/каспа, эффектами терминатора и аврорального овала, что приводило не только к росту максимальных значений частоты f_{oF_2} , но также к увеличению многослойности и диффузности треков на ионограммах. Для всех дней проведения экспериментальных исследований после 13:00 UT наблюдалось появление спорадической ионизации в виде плоских слоёв на высотах слоя E с критическими частотами $f_{oE_s} \approx 5 \div 10$ МГц.

Для ионосферы над Шпицбергенем характерно проявление полярного клефта/каспа. Трудность определения влияния области клефта/каспа состоит в том, что она представляет собой нестационарную, неоднородную и зависящую от магнитной активности область. Местоположение и структура зоны клефта/каспа регистрируется главным образом со спутников по измерениям низкоэнергичных частиц. Наземными методами касп можно определить по эффекту аномального повышения критических частот f_{oF_2} слоя в геомагнитный полдень [13]. Для Лонгиера время

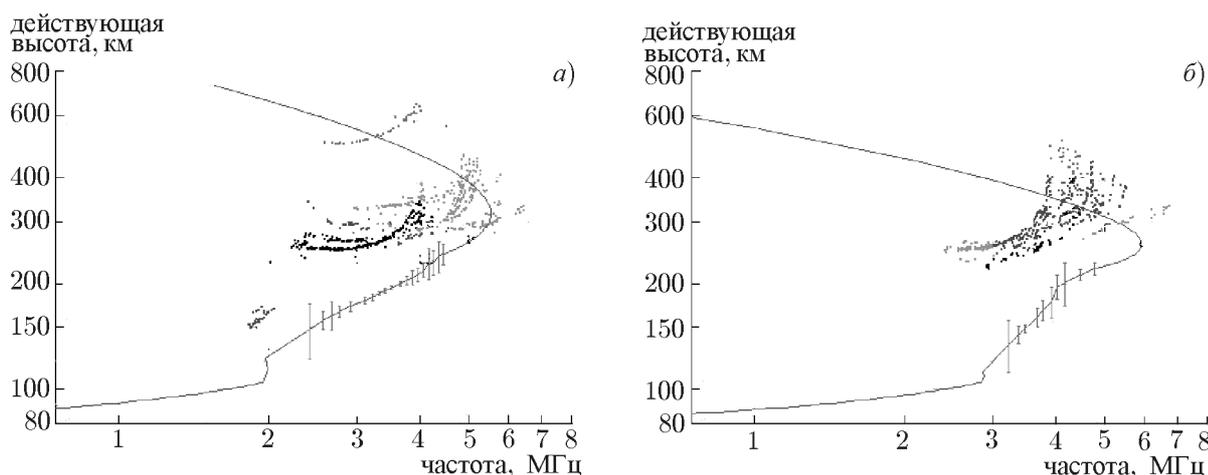


Рис. 2. Ионограммы вертикального зондирования ионосферы в координатах действующая высота — частота по данным ионозонда в г. Лонгиер в 09:48 UT (а) и 09:54 UT (б) 7 октября 2010 года. Сплошные кривые соответствуют модели ионосферы, используемой радаром, точки — экспериментальным данным

геомагнитного полдня соответствует примерно 08:00 UT. На ионограммах вертикального зондирования 7 и 8 октября 2010 года около 08:00 UT в области высот максимума слоя F_2 наблюдались дополнительные треки с частотами на $1 \div 2$ МГц выше критических частот f_{oF_2} , которые можно объяснить влиянием каспа. Треки на ионограммах 7 и 8 октября 2010 года с 09:00 до 16:00 UT были многослойными и с высокой степенью диффузности (рис. 2). В период октябрьской кампании были зарегистрированы события аврорального поглощения: 7 октября 2010 года с 10:00 до 12:18 UT и 8 октября 2010 года в период 10:24–11:40 UT. Уровни поглощения A , измеренные риометром на станции в г. Баренцбург, составили 0,12 дБ 07.10.2010 и 0,1 дБ 08.10.2010.

Проведённый анализ данных не выявил корреляции дневных возмущений частот f_{oF_2} с возмущениями магнитного поля Земли (индексами солнечной и магнитной активностей) в период нагревных экспериментов в октябре 2010 года.

2.1. Наблюдение искусственных ионосферных неоднородностей при нагреве излучением с необыкновенной поляризацией

На станции «Горьковская» 4, 7 и 8 октября 2010 года методом ракурсного рассеяния зарегистрированы диагностические коротковолновые радиосигналы, ракурсно рассеянные на мелко-масштабных искусственных ионосферных неоднородностях, созданных в ионосфере над стандом SPEAR мощной короткой волной необыкновенной поляризации. Данные о временах регистрации приведены в табл. 3.

Таблица 3. Наблюдения ракурсно рассеянных диагностических коротковолновых радиосигналов в нагревных экспериментах по модификации полярной ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением необыкновенной поляризации с использованием станда SPEAR 4, 7 и 8 октября 2010 года

Дата	Период нагрева (UT), ч:мин	Частота излучения SPEAR f_H , кГц	Соотношения между f_H , f_{oF_2} и f_{xF_2}	Пункт расположения диагностического передатчика и его частота, кГц
04.10.2010	13:50–13:55	4 600	$f_{oF_2} < f_H < f_{xF_2}$ (*)	Окечобе (США); 13 695
07.10.2010	12:13:37– –12:15:00	4 450	$f_H \sim f_{oF_2}$, $f_H < f_{xF_2}$	Вандивер (США); 11 520
	12:20–12:25	4 450	$f_H < f_{oF_2}$	Рампишам (Англия); 9 610 Ситкунай (Литва); 9 710
07.10.2010	12:50–12:55	4 450	$f_H \sim f_{oF_2}$, $f_H < f_{xF_2}$	Окечобе (США); 13 695
	13:00–13:05	4 450	$f_H \sim f_{oF_2}$	
	13:10–13:15	4 450	$f_H \sim f_{oF_2}$, $f_H < f_{xF_2}$	
	13:20–13:25	4 450	$f_{oF_2} < f_H < f_{xF_2}$ (*)	
	13:30–13:35	4 450	$f_{oF_2} < f_H < f_{xF_2}$ (*)	
08.10.2010	13:50–13:55	4 450	$f_{oF_2} < f_H < f_{xF_2}$ (*)	CUTLASS (Финляндия); 10 000; 11 500 и 13 300
	14:00–14:05	4 450		
	14:10–14:15	4 450		
08.10.2010	13:50–13:55	4 450	$f_{oF_2} < f_H < f_{xF_2}$ (*)	Окечобе (США); 13 695
	14:00–14:05	4 450		
08.10.2010	14:00–14:05	4 450	$f_{oF_2} < f_H < f_{xF_2}$ (*)	Хорби (Швеция); 13 820
	14:10–14:15	4 450		
08.10.2010	14:00–14:05	4 450	$f_{oF_2} < f_H < f_{xF_2}$ (*)	Вертачтал (Франция); 17 580

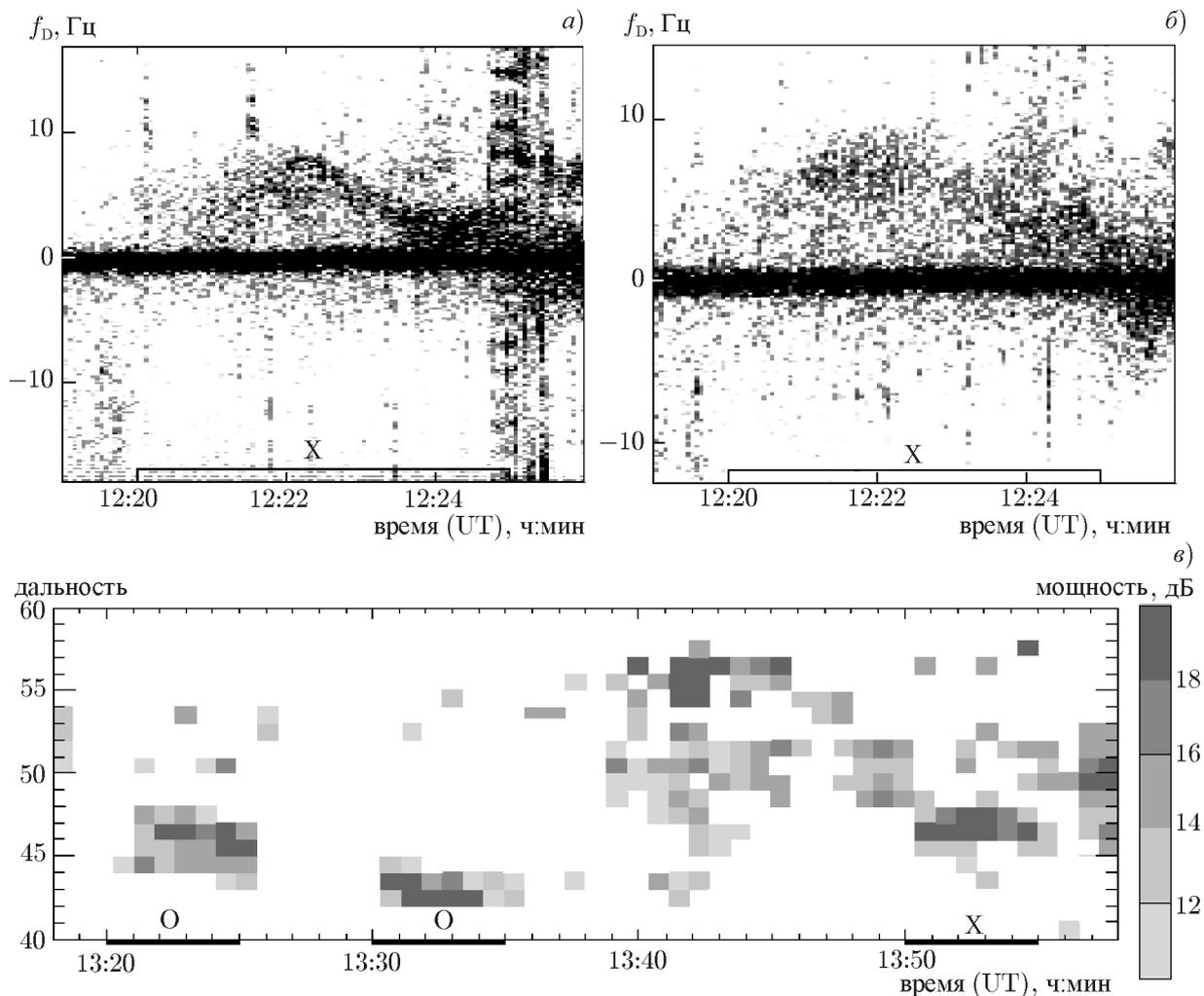


Рис. 3. Динамические доплеровские спектры диагностических коротковолновых сигналов во время нагревного эксперимента с использованием стенда SPEAR 8 октября 2010 года: (а) трасса Ситкунай—SPEAR—С.-Петербург, $f_{\text{диагн}} = 9610$ кГц; (б) трасса Рампишам—SPEAR—С.-Петербург, $f_{\text{диагн}} = 9710$ кГц. На осях времени квадратными скобками отмечен интервал излучения нагревного комплекса SPEAR. Нулевая доплеровская частота соответствует распространению диагностических сигналов по дуге большого круга на трассах Ситкунай—С.-Петербург и Рампишам—С.-Петербург. Более тёмные области соответствуют большей интенсивности. Мощность рассеянных сигналов в координатах дальность—мировое время (в) по данным когерентного коротковолнового доплеровского радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия (луч 9, ориентированный на искусственно возмущённую область ионосферы над Лонгиером) на частоте порядка 10 МГц в период эксперимента на стенде SPEAR с 13:18 до 13:58 UT 8 октября 2010 года. Регистрация рассеянных сигналов проводилась в диапазоне дальностей от 1980 до 2880 км, соответствующем «воротам» с номерами от 40 до 60. Циклы нагрева и используемая поляризация нагревной волны отмечены на оси времени

На рис. 3а и б в качестве примера представлены результаты измерений методом ракурсного рассеяния в 12:19–12:26 UT 07.10.2010. На рис. 3а показана сонограмма радиосигнала с диагностической частотой $f_{\text{диагн}} = 9610$ кГц на трассе Ситкунай—SPEAR—С.-Петербург, на рис. 3б — с частотой $f_{\text{диагн}} = 9710$ кГц на трассе Рампишам—SPEAR—С.-Петербург. Протяжённость трасс ракурсного рассеяния составляет 4605 км для трассы Ситкунай—SPEAR—С.-Петербург и порядка 5185 км для трассы Рампишам—SPEAR—С.-Петербург. В период нагревного интервала

с 12:20 до 12:25 UT стенд SPEAR излучал волну на частоте 4 450 кГц с необыкновенной поляризацией. Время излучения стенда SPEAR отмечено на оси времени квадратной скобкой. Для обоих диагностических сигналов в интервале излучения с 12:20 до 12:25 UT наблюдались сигналы с большой интенсивностью, ракурсно рассеянные на ионосферных неоднородностях. Нулевые значения сдвига доплеровской частоты $f_D = 0$ на рис. 3а, б соответствуют распространению сигнала от передатчика к приёмнику по дуге большого круга («прямой» сигнал). Как видно из рис. 3а и б, рассеянные диагностические сигналы с частотами $f_{\text{диагн}} = 9610$ кГц и $f_{\text{диагн}} = 9710$ кГц формировали диффузные треки в положительной области f_D в течение интервала нагрева 12:20–12:25 UT. Ракурсно рассеянные сигналы на обеих диагностических трассах характеризовались широкополосными спектральными компонентами в области положительных значений f_D . Полосы частот ракурсно рассеянных сигналов составили 6–8 Гц для радиосигнала из г. Ситкунай и до 9 Гц для радиосигнала из г. Рампишам.

В период нагревных экспериментов с использованием стенда SPEAR также выполнялись наблюдения радаром CUTLASS в Финляндии и Исландии. На рис. 3в в качестве примера приведены результаты измерений с 13:18 до 13:57 UT 8 октября 2010 года радаром CUTLASS в Финляндии на частоте порядка 10 МГц. Поведение рассеянных сигналов (рис. 3в) представлено в координатах дальность—мировое время. Стенд SPEAR работал на частоте $f_H = 4450$ кГц циклами 5 мин нагрев/5 мин пауза. В интервале 13:20–13:35 UT излучалась мощная радиоволна с обыкновенной поляризацией в магнитный зенит, и для частоты нагрева f_H и критической частоты f_{oF_2} обыкновенной поляризации ионосферного слоя F_2 выполнялось соотношение $f_H \leq f_{oF_2}$. Как видно из рис. 3в, в интервалы нагрева 13:20–13:25 и 13:30–13:35 UT регистрировались сигналы с достаточно большой интенсивностью, рассеянные на ионосферных неоднородностях. Далее с 13:35 до 13:50 UT был перерыв в работе нагревного стенда. В следующем интервале нагрева 13:50–13:55 UT, перед которым частота f_{oF_2} составляла порядка 4,2–4,3 МГц, была изменена поляризация нагревной волны с обыкновенной на необыкновенную. Из данных радара CUTLASS, представленных на рис. 3в, можно видеть возникновение сигналов, рассеянных на ионосферных неоднородностях с 13:50 до 13:55 UT при модификации ионосферы радиоволнами стенда SPEAR с необыкновенной поляризацией.

На рис. 4а приведена сонограмма диагностического радиосигнала на трассе Окечобе—SPEAR—С.-Петербург с частотой $f_{\text{диагн}} = 13695$ кГц, записанная с 12:51 до 13:37 UT 7 октября 2010 года. Общая протяжённость данной трассы ракурсного рассеяния составляет порядка 10 400 км. Нулевое значение сдвига частоты f_D соответствует распространению сигнала из Окечобе в С.-Петербург по дуге большого круга («прямой» сигнал). В период с 12:50 UT до 14:10 UT 07.10.2010 стенд SPEAR излучал мощные волны на частоте 4 450 кГц с необыкновенной поляризацией в режиме 5 мин нагрев/5 мин пауза. Интервалы излучения стенда SPEAR отмечены на оси времени квадратными скобками. В представленных циклах нагрева наблюдались ракурсно рассеянные коротковолновые радиосигналы передатчика из г. Окечобе. В данном сеансе нагрева радиосигналы характеризовались сильной диффузией. Доплеровские частоты f_D рассеянных радиосигналов преимущественно регистрировались в полосе от 0 до –9 Гц (за исключением интервала 12:50–12:55 UT, когда рассеянные сигналы регистрировались как в области отрицательных, так и положительных значений f_D). Вариации спектральной мощности рассеянных радиосигналов S , полученные по измеренным доплеровским спектрам, для данного сеанса наблюдений представлены на рис. 4б. Из рисунка видно усиление S в периоды излучения стенда SPEAR. На рис. 4в показаны временные вариации критических частот ионосферного слоя F_2 , рассчитанные по данным радара некогерентного рассеяния ESR с учётом ошибки измерений. Пунктирная линия на рис. 4в соответствует частоте нагревной волны стенда SPEAR ($f_H = 4450$ кГц). Данные наблюдений критических частот f_{oF_2} станцией вертикального зондирования г. Лонгиер для

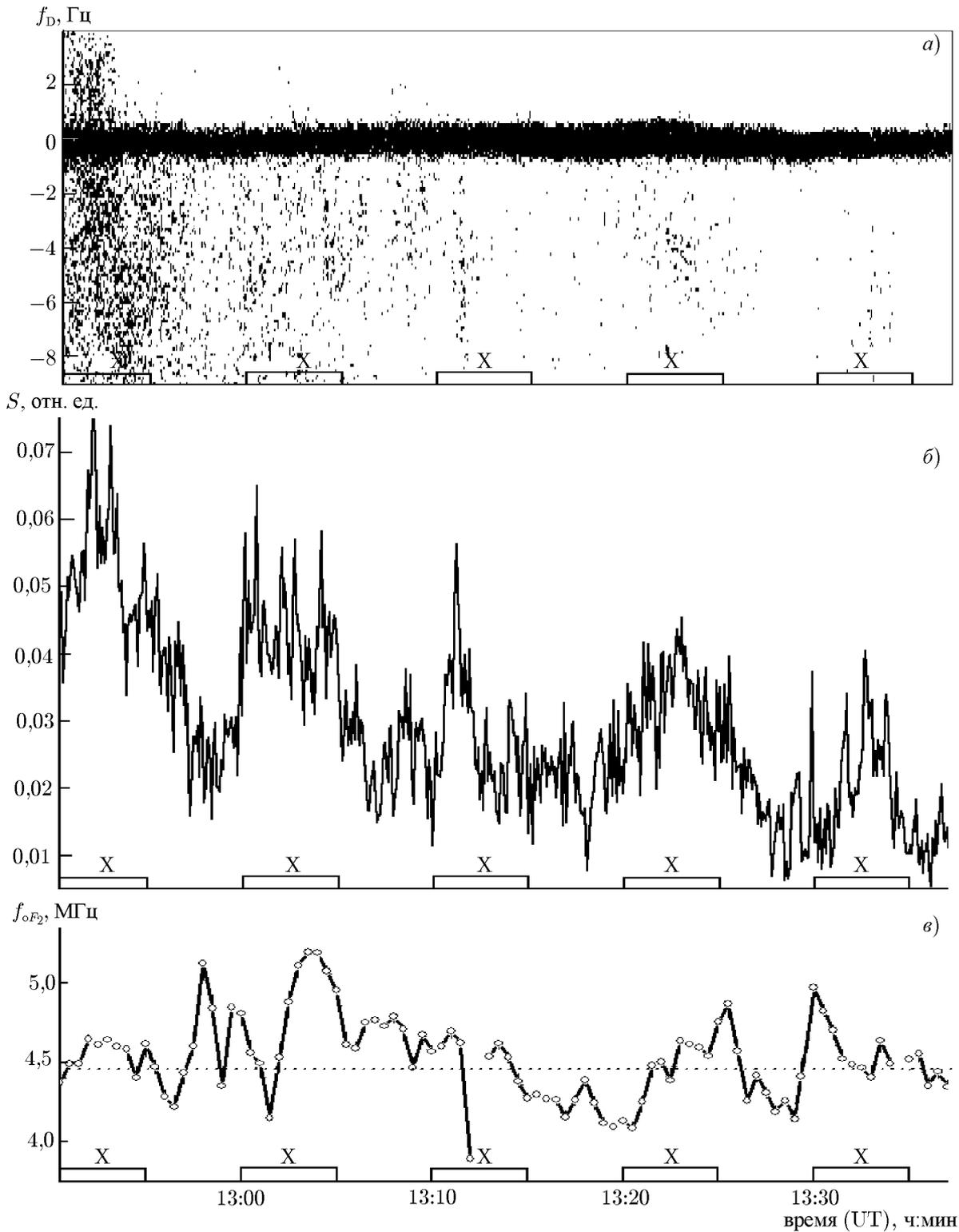


Рис. 4. Характеристики коротковолновых сигналов на трассе Окечобе–SPEAR–С.-Петербург на частоте $f_{\text{диагн}} = 13\,695$ кГц с 12:51 до 13:37 UT 7 октября 2010 года: динамические доплеровские спектры диагностических сигналов (а) и временные вариации спектральной мощности рассеянных сигналов S (б); временные вариации критических частот ионосферного слоя F_2 , рассчитанные по данным радара некогерентного рассеяния ESR г. Лонгиер (в). Квадратными скобками на оси времени отмечены циклы нагрева и используемая поляризация нагревной волны

рассматриваемого периода отсутствовали вследствие влияния аврорального поглощения или технических причин.

2.2. Динамика параметров ионосферы по данным радара некогерентного рассеяния ESR

Контроль вариаций параметров ионосферы в периоды излучения стендом SPEAR волны накачки необыкновенной поляризации проводился с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн ESR (EISCAT Svalbard Radar) в Лонгиере. Использовался режим работы радара ESR «iru», обеспечивающий проведение измерений с разрешением 5 с по времени и 3÷6 км по высоте в диапазоне высот от 90 до 500 км. Радар ESR работал 1, 4, 7 и 8 октября 2010 года с 10:00 до 14:00 UT. Измерения выполнялись вдоль направления магнитного поля (магнитный зенит). Для анализа временные вариации данных ионосферных наблюдений усреднялись на 30-секундных интервалах.

На рис. 5 показаны высотно-временные распределения электронной концентрации $N_e(h, t)$ (а) и температуры электронов $T_e(h, t)$ (б) по данным радара ESR в диапазоне высот от 100 до 350 км с 12:58 до 13:40 UT 07.10.2010. Во время нагревного эксперимента с 13:00 до 13:40 UT 7 октября 2010 года мощная радиоволна необыкновенной поляризации излучалась на частоте 4 450 кГц в направлении магнитного зенита, циклами 5 мин нагрев/5 мин пауза. Из представленных на рис. 5 данных можно видеть изменения высотных распределений параметров ионосферы, связанные с циклами нагрева: увеличение электронной концентрации N_e на высотах максимума слоя F_2 $h_{mF_2} \approx 225 \div 245$ км и на высотах 140÷180 км, меньших h_{mF_2} (рис. 5а), а также возрастание температуры электронов T_e в диапазоне высот 200÷300 км в некоторых интервалах нагрева (13:00–13:05 и 13:20–13:25 UT, рис. 5б). Отметим, что изменения в величинах N_e и T_e в интервале 13:30–13:35 UT появились до начала излучения стенда и усилились в течение цикла.

Зависимости концентрации и температуры электронов от времени, измеренные радаром ESR с 12:48 до 13:38 UT 7 октября 2010 года на фиксированных высотах 213; 230 и 246 км, близких к максимуму слоя F_2 , приведены на рис. 6. Из рис. 6а видно, что концентрация увеличивается по сравнению с фоновыми значениями перед нагревом примерно на 20 % в интервале нагрева 13:20–13:25 UT и на 15 % в интервале 13:30–13:35 UT. В интервале 13:00–13:05 UT наблюдалось сначала уменьшение электронной концентрации N_e , а затем — увеличение с 13:01:30 до 13:05 UT. Рисунок 6б показывает повышение температуры электронов T_e на высотах в области максимума слоя F_2 в интервалах нагрева 13:00–13:05; 13:20–13:25 и 13:30–13:35 UT. Увеличение температуры T_e происходило в среднем на 200÷400 К относительно фоновых значений.

Рассмотрим поведение высотных профилей электронной концентрации $N_e(h)$ в циклах нагрева с 12:50 до 13:35 UT 7 октября 2010 года. Высотные профили приведены на рис. 7 в единицах плазменных частот $f_{\text{плазм}} = 8,98 \sqrt{N_e [\text{см}^{-3}]} \text{ кГц}$. Сплошные тонкие линии соответствуют последовательности профилей $N_e(h)$, усреднённых на 1-минутных интервалах, для интервалов нагрева 12:50–12:55 UT (а), 13:00–13:05 UT (б), 13:20–13:25 UT (в) и 13:30–13:35 UT (г). Цифрами около линий обозначены порядковые номера минут, за которые выполнено усреднение для текущего нагревного цикла. Пунктирные линии соответствуют профилям $f_{\text{плазм}}(h)$, усреднённым за 30 с до начала нагрева, толстые сплошные линии — за 30 с после окончания нагрева. Отметим, что критические частоты f_{oE} регулярного слоя E в период с 12:50 до 13:38 UT составляли порядка 1,7÷1,9 МГц, максимум слоя располагался на высотах 120÷125 км.

В интервале нагрева 12:50–12:55 UT, когда регистрировались наиболее интенсивные ракурсно рассеянные сигналы диагностического передатчика из Окечобе (рис. 4), резких изменений в распределениях профилей $f_{\text{плазм}}(h)$ (рис. 7а) не наблюдалось. Критические частоты слоя F_2 со-

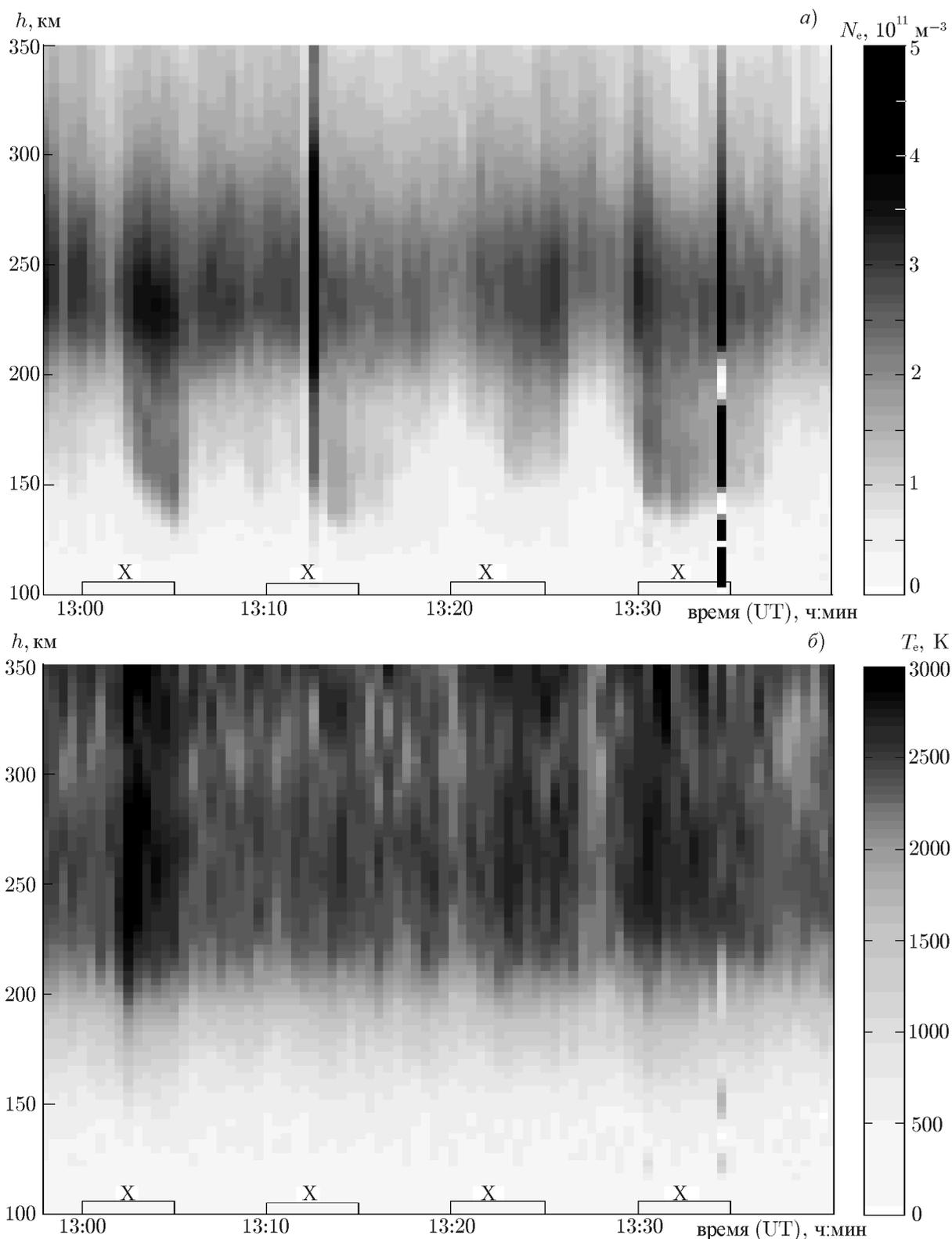


Рис. 5. Высота-временные распределения N_e (а) и T_e (б) по данным радара некогерентного рассеяния ESR (г. Лонгиер) во время нагревного эксперимента с 12:58 до 13:40 UT 7 октября 2010 года, полученные с 30-секундным разрешением. Квадратными скобками на оси времени отмечены циклы нагрева и используемая поляризация нагревной волны

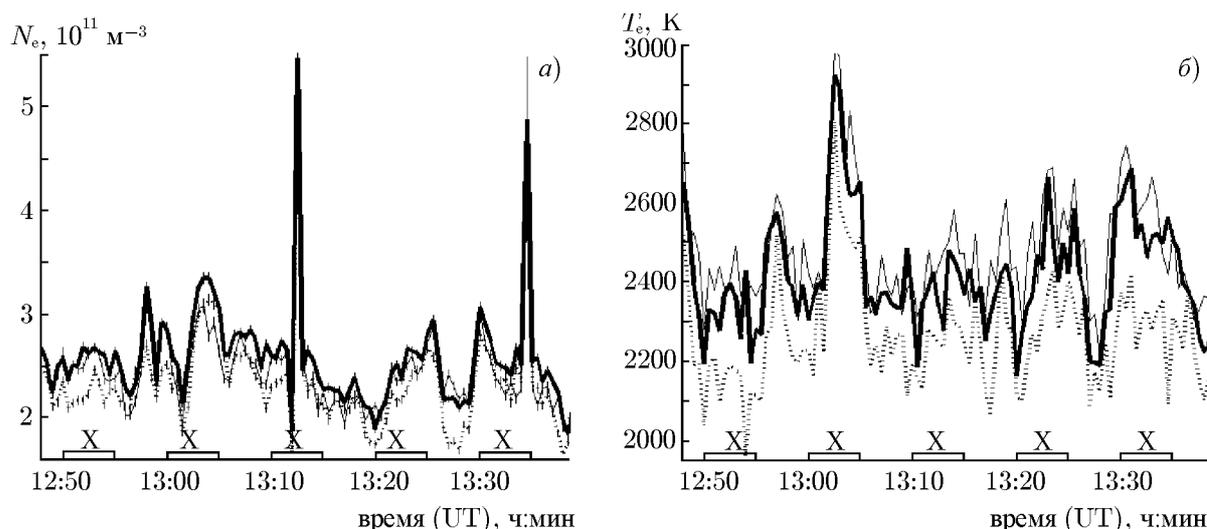


Рис. 6. Вариации концентрации N_e (а) электронов и их температуры T_e (б) по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн ESR на высотах 213 км (штриховая линия); 230 км (толстая сплошная линия) и 246 км (тонкая сплошная линия) в период проведения нагревного эксперимента с 12:51 до 13:37 UT 7 октября 2010 года. Мощная радиоволна необыкновенной поляризации излучалась на частоте 4450 кГц в магнитный зенит. Квадратными скобками на оси времени отмечены интервалы нагрева и используемая поляризация нагревной волны

ставляли до нагрева $4,40 \div 4,45$ МГц, а во время нагрева увеличились на $0,2 \div 0,3$ МГц, т. е. частота нагрева $f_H = 4450$ кГц была в пределах критических частот f_{oF_2} . После окончания излучения профиль $f_{\text{плазм}}(h)$ восстановился до фонового состояния в течение 1 мин. На интервале 12:56–12:59 UT в распределениях параметров ионосферы $f_{\text{плазм}}(h)$ и $T_e(h)$ произошли резкие изменения естественного характера.

В последующих циклах нагрева с 13:00 до 13:35 UT (рис. 7б–г), кроме увеличения частоты f_{oF_2} на величину порядка 0,5 МГц, наблюдалось появление спорадических слоёв ионизации на высотах $140 \div 180$ км с критическими частотами до 4,3 МГц. Одновременно с появлением спорадической ионизации на высотах ниже максимума слоя F_2 наблюдалось повышение температуры электронов T_e на высотах слоя F_2 . Высоты формирования максимумов температуры T_e в ионосфере соответствовали высотам максимумов электронной концентрации слоя F_2 или превышали их не более, чем на $10 \div 15$ км.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

В период модификации полярной ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением необыкновенной поляризации стенда SPEAR в октябре 2010 года зарегистрированы диагностические коротковолновые радиосигналы, ракурсно рассеянные на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях, появляющихся над стендом SPEAR (см. табл. 3, рис. 3 и 4), а также изменения распределений концентрации $N_e(h)$ и температуры $T_e(h)$ электронов в ионосфере (рис. 5–7).

Для интерпретации результатов экспериментальных измерений диагностических радиосигналов методом ракурсного рассеяния было проведено численное моделирование параметров распространения сигналов на трассах «диагностический передатчик»–SPEAR–С.-Петербург с учётом ракурсного рассеяния на мелкомасштабных ориентированных вдоль магнитного поля неоднородностях в ионосфере над комплексом SPEAR. Вычисления выполнены для гелиогеофизических

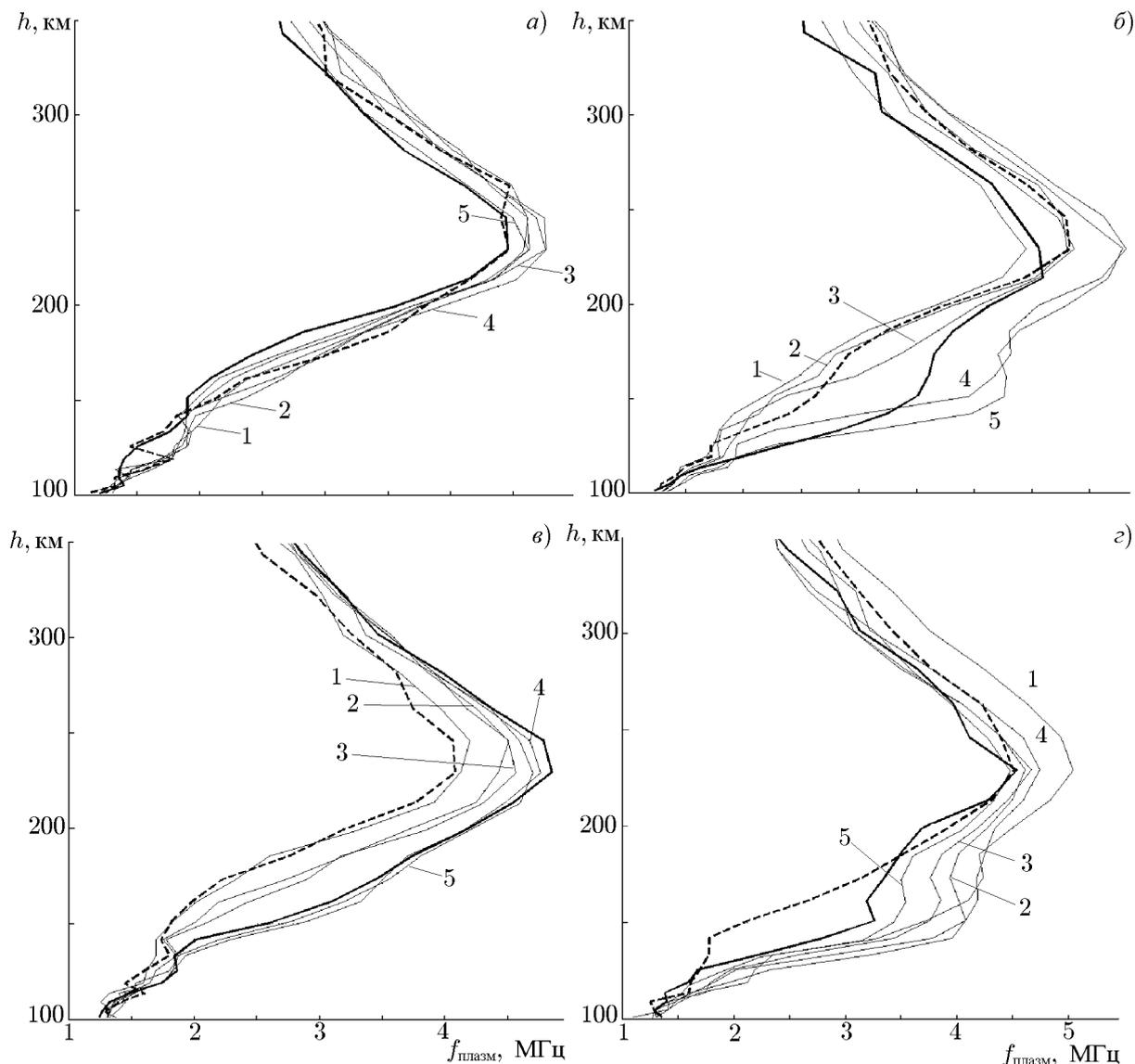


Рис. 7. Высотные профили электронной концентрации по данным радара ESR, представленные в единицах плазменных частот $f_{\text{плазм}} = 8,98 \sqrt{N_e [\text{см}^{-3}]} \text{ кГц}$, для 7 октября 2010 года. Приведены профили $f_{\text{плазм}}(h)$ для периодов излучения стенда SPEAR с 12:50 до 12:55 UT (а); с 13:00 до 13:05 UT (б); с 13:20 до 13:25 UT (в); с 13:30 до 13:35 UT (г). Тонкими линиями показаны профили, усреднённые на 1-минутном интервале, цифры соответствуют порядковому номеру минуты нагревного интервала. Штриховыми линиями отмечены профили перед сеансом нагрева, толстыми сплошными — после. Мощная радиоволна необыкновенной поляризации излучалась на частоте 4 450 кГц в магнитный зенит

условий, имевших место во время регистрации сигналов в октябре 2010 года (см. табл. 3).

Моделирование траекторий распространения коротких радиоволн реализовано в рамках приближения двухмасштабного разложения на основе метода геометрической оптики, учитывающего плавные горизонтальные неоднородности ионосферы [14]. Входными параметрами модели коротковолнового радиоканала являются: солнечная активность, характеризуемая числом Вольфа W ; магнитная активность, характеризуемая трёхчасовым индексом K_p ; время суток t ; день года; географические координаты передатчика и приёмника диагностического сигнала; геогра-

фические координаты расположения нагревного стенда SPEAR. При моделировании происходил поиск траекторий, реализующих приём диагностических радиосигналов в С.-Петербурге с учётом ракурсного рассеяния на ионосферных неоднородностях над комплексом SPEAR.

Данные статистических расчётов траекторий распространения сигналов показали, что с учётом распределений естественных градиентов ионосферы в периоды времени, указанные в табл. 3, для диагностических сигналов (см. табл. 1) существовали пути распространения между передатчиками и Санкт-Петербургом с учётом ракурсного рассеяния на ионосферных мелкомасштабных неоднородностях над комплексом SPEAR.

Первые результаты по исследованию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, возникающих при нагреве F -области ионосферы мощной короткой радиоволной необыкновенной поляризации на стенде EISCAT/Heating представлены в [8, 9]. Генерация искусственных неоднородностей сопровождалась увеличением температуры (максимум на 50 %) и концентрации (на 30 %) электронов (при эффективной мощности излучения нагревного комплекса порядка $180 \div 220$ МВт). Частота нагрева f_H в экспериментах [8, 9] удовлетворяла условию $f_{oF_2} < f_H \leq f_{xF_2}$, где f_{oF_2} и f_{xF_2} — критические частоты для обыкновенной и необыкновенной волн в слое F_2 соответственно. Авторы [8, 9] предполагают, что возможность генерации мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей радиоволнами с необыкновенной поляризацией может быть связана с возбуждением плазменных колебаний (верхнегибридных и плазменных) при индуцированном рассеянии мощных коротких радиоволн необыкновенной поляризации на ионах [15] и механизмом мелкомасштабной стратификации крупномасштабных плазменных образований [16].

Отметим, что описываемые в работе исследования проводились в дневные часы при спокойных геомагнитных условиях ($K_p \sim 1$). Данные измерений параметров фоновой полярной ионосферы (в периоды, когда нагревный стенд SPEAR не работал) демонстрировали сильную изменчивость её регулярных характеристик и высокую вероятность появления диффузных образований на высотах слоя F_2 с отчасти неоднородным распределением концентрации ионосферной плазмы, что характерно для полярной ионосферы над комплексом SPEAR [5]. Следует отметить также влияние таких крупномасштабных особенностей полярной ионосферы как клефт/касп, терминатор и авроральный овал (см. п. 2) в период проведения нагревных экспериментов. Высокая изменчивость полярной ионосферы, наряду с неизбежным дрейфом плазмы даже в слабых естественных электрических полях или из-за нейтральных ветров, будет означать, что плазма в циклах излучения нагревного стенда не будет нагреваться непрерывно. Таким образом, условия для возбуждения неустойчивостей могут не выполняться или нарушаться из-за быстрой изменчивости в течение полного нагревного цикла. Изменения концентрации плазмы могут также привести к сильным локальным колебаниям электрического поля нагревной волны, так что пороговые уровни мощности излучения, необходимые для создания неустойчивостей, могли быть превышены только на коротких временных интервалах в течение цикла нагрева. Отметим, что максимальная эффективная мощность излучения стенда SPEAR достаточно невысокая ($P_{эфф} = 15$ МВт), в то время как для стенда EISCAT/Heating в г. Тромсё при использовании фазированной решётки № 2, обеспечивающей ширину диаграммы направленности антенной системы порядка $12^\circ \div 14^\circ$ $P_{эфф} = 190 \div 250$ МВт. Перечисленные выше факторы могут объяснить нестабильность отклика ионосферы в экспериментах с использованием нагревного стенда SPEAR.

При регистрации искусственных ионосферных неоднородностей, созданных радиоизлучением стенда SPEAR в октябре 2010 года, соотношения между частотой волны накачки f_H и критическими частотами обыкновенной f_{oF_2} и необыкновенной f_{xF_2} волн ионосферы в паузы перед некоторыми нагревными циклами имели вид $f_{oF_2} < f_H < f_{xF_2}$, как и в экспериментах на стенде EISCAT (такие циклы в табл. 3 отмечены знаком (*)). В то же время перед другими циклами

нагрева, например, с 12:13 до 13:15 UT 7 октября 2010 года, частота нагрева f_H была сопоставима или ниже f_{oF_2} ($f_H \sim f_{oF_2}$ или $f_H \leq f_{oF_2}$). Во время нагрева, как правило, имело место возрастание электронной концентрации N_e для всех циклов регистрации мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, и для частоты нагрева f_H выполнялись условия $f_H < f_{oF_2}$ и $f_H < f_{xF_2}$, однако формирование неоднородностей и изменения параметров ионосферы N_e и T_e продолжались.

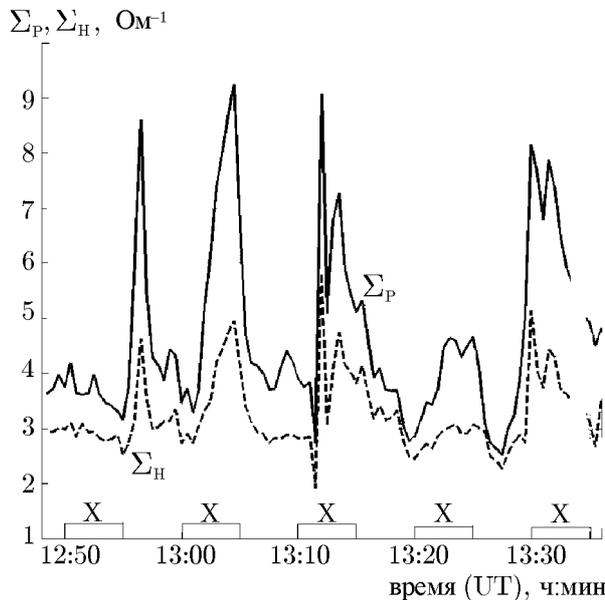


Рис. 8. Вариации интегрированных по высоте холловской Σ_H (штриховая линия) и педерсеновской Σ_P (сплошная линия) проводимостей ионосферы в период с 12:48 до 13:32 UT 7 октября 2010 года, рассчитанные по данным радара ESR г. Лонгьер для диапазона высот от 80 до 400 км

стенда SPEAR предлагается гипотеза X-О-трансформации электромагнитных волн в анизотропной неоднородной высокоширотной ионосфере в области, в которой нарушается приближение геометрической оптики. Падающая необыкновенная волна в области отражения расщепляется на попутные обыкновенную и необыкновенную волны и встречную необыкновенную волны [17, 18]. Обыкновенная волна при распространении достигает высот верхнегибридного резонанса (верхнегибридная частота $f_{UH} = f_H$ и $f_o = (f_H^2 - f_{ce}^2)^{1/2} \approx 4,22 \div 4,29$ МГц), где развивается резонансная неустойчивость и происходит возбуждение мелкомасштабных ионосферных неоднородностей.

Формирование спорадической ионизации ниже слоя F_2 регистрировалось в спокойных геомагнитных условиях 07.10.2010 с 13:00 до 13:35 UT. Анализ высотных профилей $N_e(h)$ показывает, что наблюдается связь между временем появления дополнительной ионизации на высотах 140–180 км и периодами нагревных циклов стенда SPEAR. Проведённые численные оценки возможного относительного изменения электронной концентрации $\delta N_e/N_e$ вследствие нарушения ионизационно-рекомбинационного баланса при нагреве ионосферной плазмы в поле мощной волны с использованием [20, 21] и данных моделирования по модели атмосферы MSIS-E-90 [22] составили значения $\delta N_e/N_e \approx 5\%$ на высоте 160 км и $\delta N_e/N_e \approx 2\%$ на высоте 225 км. По данным радара некогерентного рассеяния ESR на высоте 161–163 км электронная концентрация увеличивалась на 50–200% в периоды нагрева на временном интервале 13:00–13:35 UT. На ионограммах вертикального зондирования 7 октября 2010 года было зарегистрировано прояв-

Сопоставительный анализ времён нарастания и релаксации искусственных ионосферных неоднородностей в нагревных экспериментах с использованием стендов SPEAR и EISCAT показал, что ракурсно рассеянные сигналы в экспериментах на стенде SPEAR появлялись с временной задержкой в несколько секунд, даже при первичном (после длительной паузы) излучении мощной радиоволны с необыкновенной поляризацией, а время релаксации неоднородностей не превышало 30–60 с. В экспериментах на стенде EISCAT время нарастания ракурсно рассеянных сигналов составляло 1–4 мин, а время релаксации варьировалось от 5 до 20 мин.

Как известно [17], мощная радиоволна необыкновенной поляризации с частотой $f_H = 4450$ кГц отражается от слоя ионосферы на высотах, где плазменная частота $f_{\text{плазм}} = [f_H \times (f_H - f_{ce})]^{1/2} \approx 3,7 \div 3,8$ МГц. В качестве возможного объяснения появления мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при нагреве ионосферы радиоволнами с необыкновенной поляризацией высокоширотного

ление каспа (раздел 2). Можно предположить, что возрастание электронной концентрации N_e на высотах 140÷180 км 7 октября 2010 года после 13:00 UT обусловлено ростом потока не связанных с нагревом электронов с энергией от сотен электронвольт до 1÷2 кэВ, инициированных воздействием мощной радиоволны на полярную ионосферу. Возрастание потоков в интервалах нагрева с 13:00 UT подтверждается возрастанием в них интегральной холловской и педерсеновской проводимостей. Результаты вычислений интегрированных по высоте холловской Σ_H и педерсеновской Σ_P проводимостей [23] по данным ионосферных измерений радаром ESR в области высот от 80 до 350 км приведены на рис. 8. Результаты демонстрируют усиление ионосферной проводимости Σ_P в четырёх последовательных циклах нагрева с 13:00 UT. В интервале 12:55–13:00 UT (пауза между интервалами нагрева) возрастание Σ_H и Σ_P обусловлено естественными высыпаниями электронов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты экспериментов по модификации слоя F_2 полярной ионосферы мощными короткими радиоволнами необыкновенной поляризации, выполненных в октябре 2010 года с использованием нагревного комплекса SPEAR (г. Лонгьер, арх. Шпицберген). Диагностика воздействия мощных коротких радиоволн осуществлялась методом ракурсного рассеяния на сети диагностических коротковолновых радиотрасс доплеровским радаром CUTLASS (Ханкасалми, Финляндия) и радаром некогерентного рассеяния радиоволн ESR (г. Лонгьер). Эксперимент проводился в период низкой солнечной активности при спокойных геомагнитных условиях.

Анализ результатов экспериментальных измерений в периоды излучения мощных коротких радиоволн с необыкновенной поляризацией нагревного стенда SPEAR обнаружил:

- 1) возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей;
- 2) изменения параметров полярной ионосферы: возрастание электронной концентрации на 10÷25 % и температуры на 10÷30 % на высотах слоя F_2 ;
- 3) формирование спорадической ионизации ниже слоя F_2 .

Для объяснения эффектов при нагреве ионосферы радиоволнами необыкновенной поляризации предложена гипотеза трансформации необыкновенных электромагнитных волн в обыкновенные в анизотропной высокоширотной неоднородной ионосфере.

Выполнено численное моделирование параметров распространения диагностических коротких радиоволн, которое продемонстрировало возможность регистрации сигналов методом ракурсного рассеяния в С.-Петербурге на протяжённых радиотрассах в нагревных экспериментах с использованием стенда SPEAR.

Работа выполнена при поддержке научного совета Норвегии в рамках гранта SPEAR–UNIS–AARI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич А. В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
2. Грач С. М., Караштин А. Н., Митяков Н. А. и др. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. С. 1330.
3. Васьков В. В., Гуревич А. В. // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. С. 176.
4. Благовещенская Н. Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. С.-Петербург: Гидрометеиздат, 2001. 288 с.
5. Robinson T. R., Yeoman T. K., Dhillon R. S., et al. // Ann. Geophys. 2006. V. 24. P. 291. <http://www.ann-geophys.net/24/291/2006>.

6. Dhillon R. S., Robinson T. R., Yeoman T. K. // *Ann. Geophys.* 2007. V. 25. P. 1 801.
7. Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Корниенко В. А. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2008. Т. 51, № 11. С. 939.
8. Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Йоман Т. К., Ритвельд М. Т. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2010. Т. 53. С. 571.
9. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Yeoman T. K., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. Art. no. L08802.
10. Lofas H., Ivchenko N., Gustavsson B., et al. // *Ann. Geophys.* 2009. 27. P. 2 585.
11. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 2003. V. 108, No. 4. Art. no. SIA 2-1. doi:10.1029/2002JA009543.
12. Greenwald R. A., Baker K. B., Dudeney J. R., et al. // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 71. P. 761.
13. Шульгина Н. В. // *Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике солнца.* М.: Наука, 1982. Вып 59. С. 40.
14. Борисова Т. Д., Баранец А. Н., Черкашин Ю. Н. // *Распространение радиоволн в ионосфере.* М.: Наука, 1986. С. 12.
15. Vas'kov V. V., Ryabova N. A. // *Adv. Space Res.* 1998. V. 21, No. 5. P. 697.
16. Frolov V. L., Kagan L. M., Sergeev E. N., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 1999. V. 104, No. 6. P. 12 695.
17. Гинзбург В. Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме.* М.: Наука, 1967. 684 с.
18. Вяткин В. М. *Линейная трансформация характеристических волн в неоднородной магнитоактивной плазме при наличии точек вырождения различной кратности: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.* СПб., 1992. 13 с.
19. Гуревич А. В., Зыбин К. П., Карлсон Х. С. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2005. Т. 48, № 9. С. 772.
20. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере.* М.: Наука, 1973. 272 с.
21. Schunk R. W., Nagi A. *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry.* Cambridge University Press, 2000. 554 p.
22. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html.
23. Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П. *Магнитосферно-ионосферное взаимодействие.* М.: Наука, 1983. 278 с.

Поступила в редакцию 3 октября 2011 г.; принята в печать 23 января 2012 г.

**EFFECTS OF MODIFICATION OF THE POLAR IONOSPHERE
WITH HIGH-POWER SHORT-WAVE EXTRAORDINARY-MODE HF WAVES
PRODUCED BY THE SPEAR HEATING FACILITY**

T. D. Borisova, N. F. Blagoveshchenskaya, A. S. Kalishin, K. Oksavik, L. Baddelley, and T. K. Yeoman

We present the results of modifying the F₂ layer of the polar ionosphere experimentally with high-power short HF extraordinary-mode waves. The experiments were performed in October 2010 using the short-wave SPEAR heating facility (Longyearbyen, Spitsbergen). To diagnose the effects of high-power short HF waves by the aspect-scattering method in a network of diagnostic paths, we used the short-wave Doppler radar CUTLASS (Hankasalmi, Finland) and the incoherent scatter radar ESR (Longyearbyen, Spitsbergen). Excitation of small-scale artificial ionospheric irregularities was revealed, which were responsible for the aspect and backward scattering of the diagnostic signals.

The measurements performed by the ESR incoherent scatter radar simultaneously with the heating demonstrated changes in the parameters of the ionospheric plasma, specifically, an increase in the electron density by 10–25% and an increase in the electron temperature by 10–30% at the altitudes of the F₂ layer, as well as formation of sporadic ionization at altitudes of 140–180 km (below the F₂ level maximum). To explain the effects of ionosphere heating with HF extraordinary-mode waves, we propose a hypothesis of transformation of extraordinary electromagnetic waves to ordinary in the anisotropic, smoothly irregular ionosphere.