УДК 533.951+537.868

СМЕЩЁННЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ЛИНИИ В НАГРЕВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ НА ЧАСТОТАХ ВОЛНЫ НАКАЧКИ ВБЛИЗИ ГАРМОНИК ГИРОЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОНОВ

Т. Д. Борисова^{1*}, Н. Ф. Благовещенская¹, М. Т. Риетвельд^{2,3}, И. Хаггстром⁴

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия ² Европейская научная Ассоциация EISCAT, г. Тромсе;

³ Университет Тромсе, Норвегия

⁴ Европейская научная Ассоциация EISCAT, г. Кируна, Швеция

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик и условий возникновения смещённых плазменных линий, которые наблюдаются в экспериментах по модификации высокоширотной F-области ионосферы мощными короткими радиоволнами с обыкновенной поляризацией от нагревного комплекса EISCAT/Heating на частотах волны накачки вблизи четвёртой и пятой гармоник гирочастоты электронов. Излучение осуществлялось в направлении магнитного зенита длительными циклами воздействия (от 2 до 20 мин). Исследования выполнены по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн EISCAT в г. Тромсё (рабочая частота радара 930 МГц). Анализ данных радара продемонстрировал одновременное возбуждение на длительных интервалах воздействия (больше 30 с) нескольких плазменных линий, которые наблюдались на частотах, близких к частоте волны накачки, и на частотах, смещённых от неё в сторону увеличения на 0,15÷0,45 МГц. Смещённые плазменные линии обладали спектральной шириной 0,10÷0,15 МГц. Исследованы закономерности их возникновения в зависимости от соотношения между частотой волны накачки и гармониками гирочастоты и близости частоты волны накачки к критической частоте ионосферного слоя F2. Обсуждаются возможные механизмы возбуждения смещённых плазменных линий. Выполнено сравнение экспериментальных данных и результатов расчётов характеристик смещённых плазменных линий для различных частот волны накачки.

ВВЕДЕНИЕ

При модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами с обыкновенной поляризацией в областях резонансного взаимодействия формируется целый ряд неустойчивостей, которые вызывают существенные изменения параметров и поведения ионосферной плазмы [1–10]. Вблизи ионосферных высот отражения мощных коротких радиоволн возбуждаются параметрические распадные неустойчивости: периодическая стрикционная неустойчивость (parametric decay instability, PDI) и апериодическая стрикционная неустойчивость (oscillating two stream instability, OTSI) [1, 2, 6, 7]. Проявления неустойчивостей PDI и OTSI непосредственно идентифицируются по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн. Подобные радары регистрируют продольные плазменные волны, такие как ленгмюровские и ионно-акустические [2– 5]. В спектрах радара они проявляются как инициированные нагревом плазменные линии (HFinduced plasma lines, HFPL) в высокочастотном канале измерений и усиленные ионные линии (HF-enhanced ion lines, HFIL) в низкочастотном канале измерений [4–7].

Вблизи высот верхнего гибридного резонанса волны накачки развивается тепловая параметрическая (резонансная) неустойчивость (thermal (resonance) parametric instability, TPI), ответственная за генерацию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, вытянутых вдоль геомагнитного поля [8–10], которые подавляют процессы развития неустойчивостей PDI и OTSI [2].

810

^{*} borisova@aari.ru

В ряде экспериментов по модификации F-области ионосферы мощными короткими радиоволнами с обыкновенной поляризацией в спектрах некогерентного радара наблюдалось одновременное возбуждение нескольких плазменных линий (HFPL). Они регистрировались при включении нагревного стенда как на частоте, близкой к частоте волны накачки $f_{\rm H}$ (линии HFPL $_{\rm f_H}$, возникающие в результате возбуждения параметрических распадных неустойчивостей), так и на частотах $f_{\rm PLout+}$, смещённых относительно $f_{\rm H}$ в сторону увеличения на десятки—сотни килогерц (линии HFPL_{out+}). Эффекты генерации линий HFPL_{out+} наблюдались в экспериментах на нагревных комплексах, расположенных на различных географических широтах: EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвергия) [11–17], Аресибо (Пуэрто-Рико) [18–21] и НААRР (Аляска) [22]. В литературе плазменные линии на смещённых частотах получили названия «the outshifted plasma line» [13], «displaced plasma lines» [12], «free mode» [23] или «дополнительные» плазменные линии [15–17]. Исследования генерации смещённых плазменных волн в нагревных экспериментах [11–14, 18– 21, 23] выполнялись при вертикальном излучении волны накачки короткими циклами нагрева (длительность менее 200 мс, условия, приближённые к «холодному» старту), чтобы избежать влияния процессов возбуждения искусственных ионосферных неоднородностей. В работах [15– 17] была показана возможность одновременного возбуждения плазменных линий вблизи частоты волны накачки (линии HFPL_{fн}), и на частотах, смещённых относительно частоты волны накачки $f_{\rm H}$ в сторону увеличения частоты (линии HFPL_{out+}), и при ступенчатом изменении частоты f_H вблизи четвёртой и пятой гармоник гирочастоты электронов. Излучение проводилось в направлении магнитного зенита. В этих экспериментах на комплексе EISCAT/Heating возбуждение плазменных линий HFPL_f и HFPL_{out+} сопровождалось генерацией интенсивных ионосферных неоднородностей [16, 17, 24]. Это имело место при использовании высоких эффективных мощностей волны накачки, создающих уровни напряжённости электрического поля в ионосфере выше 0,7 В/м [24].

Теоретические исследования механизмов возбуждения смещённых плазменных (ленгмюровских) волн выполнялись в рамках приближений слабой и сильной турбулентностей на основе модели Захарова и её развития [18, 25–32]. В работах [23, 28] возбуждение плазменных линий HFPL_{out+} на смещённых частотах объяснялось в рамках приближения теории сильной турбулентности с учётом дисперсии ленгмюровской волны в плазме с конечной температурой электронов. В работе [17] рассмотрен один из возможных механизмов генерации плазменных линий на частотах, смещённых в сторону увеличения (линии HFPL_{out+}), на основе четырёхволнового процесса взаимодействия. Плазменная волна с частотой f_{PLout+} формируется при взаимодействии волн Бернштейна и ионосферных плазменных и верхнегибридных волн, возбуждаемых вследствие трансформации волны накачки на высоте, близкой к высоте верхнего гибридного резонанса.

В ряде экспериментов [11, 13] плазменные линии на смещённых частотах (линии HFPL_{out+}), наблюдались на высотах, расположенных выше уровня отражения мощной короткой радиоволны с обыкновенной поляризацией. В этих условиях возбуждение линий HFPL_{out+} объяснялось результатом трансформации мощной короткой радиоволны с обыкновенной поляризацией в *z*-моду [33].

В работах [34, 35] представлены интересные результаты лабораторных экспериментальных исследований по формированию дополнительных линий в спектре ленгмюровских волн, отстроенных от несущей частоты.

Данная статья посвящена детальному изучению условий возбуждения и характеристик высокочастотных плазменных волн на частотах, смещённых относительно частоты излучения $f_{\rm H}$ в сторону увеличения на десятки—сотни килогерц ($f_{\rm PLout+}$), наблюдавшихся в экспериментах по воздействию мощных коротких радиоволн обыкновенной поляризации на частотах вблизи гармоник гирочастоты электронов $f_{\rm ce}$. Основной акцент делается на детальном анализе большого объёма экспериментальных данных, полученных на нагревном комплексе EISCAT/Heating. На их основе рассматриваются закономерности возникновения смещённых плазменных линий в зависимости от соотношения между частотами $f_{\rm H}$ и $nf_{\rm ce}$ (n = 4, 5) и близости частоты $f_{\rm H}$ к критической частоте ионосферного слоя F_2 . Уделено внимание также обсуждению возможных механизмов возбуждения смещённых плазменных линий и сравнению экспериментально наблюдаемых и численных оценок смещений их частот.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОВЕДЁННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследование эффектов возбуждения плазменных линий на частотах, смещённых от частоты $f_{\rm H}$ в сторону увеличения, выполнялось по данным экспериментов по модификации высокопиротной F-области ионосферы, проведённых с 2011 по 2015 годы с помощью коротковолнового нагревного комплекса EISCAT/Heating в г. Тромсё, Норвегия (координаты 69,6° с. ш., 19,2° в. д.; параметр Мак-Илвайна L = 6,2, магнитное наклонение $I = 78^{\circ}$). Детальные технические характеристики комплекса EISCAT/Heating приведены в работе [36]. Излучение мощных коротких радиоволн с обыкновенной поляризацией проводилось на фиксированных частотах $f_{\rm H} = 5,423$; 6,200; 6,770; 6,960; 7,100 МГц, а также при ступенчатом (пошаговом) изменении частоты $f_{\rm H}$ вблизи четвёртой и пятой гармоник гирочастоты электронов в диапазонах 5,3÷5,6 и 6,7÷7,0 МГц соответственно. В экспериментах использовалась фазированная антенная решётка с шириной диаграммы направленности 5°÷6°, обеспечивающая эффективную мощность излучения в диапазоне частот 5,4÷7,0 МГц порядка P_{eff} ≈ 550÷650 МВт. Нагревный комплекс излучал в режимах (2–5–10–20) мин нагрев/(1–2–5–10) мин пауза, начиная с первой и тридцать первой минуты часа в направлении магнитного зенита (наклон диаграммы направленности антенны составлял 12° к югу от вертикали, азимут 185°).

Исследование характеристик и поведения смещённых плазменных линий проводилось преимущественно по данным радара некогерентного рассеяния (930 МГц) [37], пространственно совмещённого с нагревным комплексом EISCAT/Heating. В период экспериментов измерения радаром выполнялись в диапазоне дальностей от 90 до 600 км с минимальным разрешением по дальности 1,5 км, по времени — 5 с. Луч радара и направление излучения мощной короткой радиоволны были ориентированы вдоль силовой линии магнитного поля Земли. Далее в статье результаты радарных измерений представлены в зависимости от высоты от поверхности Земли, пересчитанной из дальностей вдоль направления магнитного поля Земли: $h = R_{angl} \cos(12^\circ)$. Первичные (raw) данные этих измерений были обработаны с помощью унифицированного комплекса программ GUISDAP [38]. Рассчитывались параметры ионосферной плазмы, такие как концентрация $N_{\rm e}$ и температура $T_{\rm e}$ электронов, а также спектральные мощности $S_{\rm PL}$ инициированных нагревом плазменных линий HFPL в высокочастотном канале измерений радара и спектральные мощности S_{IL} усиленных нагревом ионных линий HFIL в низкочастотном канале. Значения мощностей S_{PL} и S_{IL} были получены в результате интегрирования данных радарных измерений с постоянным шагом по высоте 3 км и с различным шагом интегрирования по времени от 5 до 30 с. При анализе использовались данные, достоверность которых подтверждалась значением параметра Residual < 2 [38].

Для анализа условий возбуждения смещённых плазменных линий привлекались также данные наблюдений мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей над г. Тромсё по данным измерений когерентным коротковолновым радаром CUTLASS (SUPERDARN) (Xanкасалми, Финляндия) [39]. Регистрация интенсивностей сигналов коротковолнового радара, обратно рассеянных от неоднородностей, выполнялась на частотах 13; 16; 18 и 20 МГц с временны́м разрешением 3 с и разрешением по дальности 15 км.

812

Параметры фоновой плазмы на высотах F_2 -слоя ионосферы (значения критических частот f_{0F_2} и высот максимумов h_{mF_2}) регистрировались ионозондом вертикального зондирования ионосферы в г. Тромсё [40]. В данной работе представлены данные экспериментов, выполненных в условиях отражения мощной радиоволны от ионосферы, $f_{\rm H} \approx f_{0F_2}$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

2.1. Результаты наблюдений радаром некогерентного рассеяния EISCAT при фиксированной частоте нагрева 5,423 МГц

Радары некогерентного рассеяния позволяют непосредственно обнаруживать продольные плазменные волны (ленгмюровские и ионно-акустические), которые идентифицируются в спектрах радаров по появлению инициированных нагревом плазменных линий HFPL и усиленных ионных линий HFIL. В экспериментах использовался радар некогерентного рассеяния EISCAT, работающий на частоте 930 МГц, что вследствие условия рассеяния Брэгга позволяло обнаруживать турбулентность с масштабом l = 0.16 м $(l = c/(2f_{\rm rad}))$, где с — скорость света, $f_{\rm rad}$ частота радара). Для максвелловской плазмы (плазмы в тепловом равновесии) спектр радара в низкочастотной области, как правило, имеет форму с двумя максимумами, смещёнными относительно нуля, соответствующего частоте радара, в отрицательную и положительную области, что отвечает ионно-акустическим волнам, направленным «от» и «к» радару (down- и up- shifted ion lines) и возможным третьим несмещённым максимумом около нуля (non-shifted ion line). Величина доплеровского смещения максимумов ионных линий относительно нуля зависит от частоты излучения радара и для радара EISCAT (930 МГц) на высотах F-области ионосферы составляет величину порядка $f_{\rm IA} = \omega_{\rm IA}/(2\pi) \approx 10$ кГц (без учёта затухания Ландау). В высокочастотном канале измерений радар EISCAT позволяет проводить регистрацию плазменных волн, направленных только «от» pagapa (downshifted plasma line). В традиционном представлении радарных данных это соответствует отрицательной отстройке f.

Как известно [2–5, 41], резкое возрастание интенсивности усиленных нагревом ионных линий HFIL и инициированных нагревом плазменных линий HFPL в спектре сигнала радара некогерентного рассеяния свидетельствует о возбуждении ионо-акустических и ленгмюровских волн, что является прямым указанием на развитие периодической неустойчивости (PDI) на высотах вблизи отражения мощной короткой радиоволны в ионосфере. Наличие несмещённого максимума в спектре ионных линий (nonshifted ion line) свидетельствует о развитии апериодической неустойчивости (OTSI). Основной спектральный максимум плазменных линий около частоты нагрева $f_{\rm H}$ смещён относительно неё на частоту ионно-акустической волны $f_{\rm IA}$.

Рассмотрим результаты экспериментов по излучению мощной короткой радиоволны при фиксированной частоте $f_{\rm H} = 5,423~{\rm MF}$ ц. В табл. 1 сведены характеристики смещённых плазменных линий (сдвиг частоты спектрального максимума в сторону увеличения от частоты нагрева $\Delta f_{\rm exp}$, высоты возбуждения h, и температура электронов $T_{\rm e}$), по данным радара, гирочастота электронов и её четвёртая гармоника ($f_{\rm ce}$ и $4f_{\rm ce}$) по модели [42] для экспериментов, выполненных на частоте 5,423 МГц в период 2012–2015 годов, когда возбуждались смещённые плазменные линии в периоды времени более 30 с. В табл. 1 также приведены рассчитанные частотные смещения $\Delta f_{\rm free}$ и $\Delta f_{\rm Bern}$, которые обсуждаются в разделе 3. Результаты, представленные в табл. 1, соответствуют условиям, когда на высотах возбуждения смещённых плазменных линий частота нагрева была ниже частоты четвёртой гармоники гирочастоты электронов ($f_{\rm H} < 4f_{\rm ce}$). Плазменные линии возбуждались на частотах, смещённых относительно частоты $f_{\rm H}$ в сторону увеличения на $0,2\div0,45~{\rm MF}_{\rm H}$.

| Таблица 1. Характеристики смещённых плазменных линий (сдвиг частоты спектрального максиму- |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ма в сторону увеличения от частоты нагрева Δf_{exp} и высоты возбуждения $h),$ значения гирочастоты |
| электронов $f_{\rm ce}$ и её четвёртой гирогармоники $4f_{\rm ce}$, температура электронов $T_{\rm e}$, а также рассчитан- |
| ные значения частотного смещения $\Delta f_{ m free}$ и $\Delta f_{ m Bern}$ при нагреве высокоширотной F -области ионо- |
| сферы на фиксированной частоте 5,423 МГц для различных дат и времён наблюдения |

| Дата | Время (UT), | h, | $f_{\rm ce},$ | $4f_{\rm ce},$ | $\Delta f_{\rm exp},$ | $\Delta f_{\rm Bern},$ | $T_{\rm e},$ | $\Delta f_{\rm free},$ |
|------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------------------------|------------------------|--------------|------------------------|
| | ч:мин | KM | ΜГц | МΓц | МΓц | МΓц | Κ | ΜГц |
| 22.02.2012 | $15:08 \div 15:09$ | 230 | 1,362 | $5,\!448$ | $0,\!200/0,\!370$ | $0,\!19$ | 3200 | $0,\!370$ |
| 21.02.2013 | $14:31\div14:33$ | 225 | 1,373 | $5,\!492$ | $0,\!240/0,\!400$ | 0,23 | 3400 | $0,\!405$ |
| 25.02.2013 | $8:00 \div 9:15$ | $198{\div}207$ | $1,\!372 \div$ | $5,\!488 \div$ | $\frac{0,240 \div 0,280}{0,420 \div 0,450}$ | $0,24 \div$ | 3400÷ | 0,420 |
| | | | $\pm 1,378$ | $\div 5,512$ | , , | $\pm 0,27$ | $\div 2000$ | |
| 25.02.2013 | 15:00÷16:10 | 210÷220 | $1,357 \div$ | $5,\!428 \div$ | $\frac{0,200\div0,230}{0,440\div0,450} \qquad 0,18\div$ | | 3500 | 0,445 |
| | | | $\pm 1,367$ | $_{\pm 5,468}$ | , , | $\div 0,23$ | | |
| 24.10.2013 | $14:00 \div 15:00$ | $198{\div}201$ | $1,375 \div$ | $5,500 \div$ | $\frac{0,240\div0,280}{0,420}$ | $0,25 \div$ | 3500 | 0,420 |
| | | | $\pm 1,377$ | $\pm 5,508$ | , | $\div 0,26$ | | |
| 25.10.2013 | $12:01 \div 12:03$ | 192 | 1,383 | 5,532 | $0,\!275/0,\!430$ | 0,286 | 3 700 | 0,440 |
| 26.10.2013 | $12:01\div12:03$ | 186 | $1,\!384$ | $5,\!536$ | $0,\!280/0,\!420$ | 0,283 | 3500 | 0,420 |
| 29.10.2013 | $12:01\div12:03$ | 192 | 1,383 | 5,532 | $0,\!450$ | $0,\!270$ | 3700 | 0,440 |
| 30.10.2013 | $13:36 \div 13:39$ | 230 | 1,361 | $5,\!444$ | $0,\!210/0,\!420$ | $0,\!196$ | 3000 | 0,420 |
| 1.11.2013 | $12:56 \div 12:59$ | 211 | 1,370 | $5,\!48$ | 0,260/0,440 | $0,\!270$ | 3 700 | 0,440 |
| 28.10.2015 | $15:31 \div 15:37$ | 230 | 1,361 | 5,444 | 0,350 | 0,195 | 3 000 | 0,350 |

Рисунки 1 и 2 демонстрируют примеры регистрации радаром характеристик и поведения усиленных нагревом ионных и плазменных линий в циклах нагрева 24 октября и 25 февраля 2013 года соответственно. Эксперимент 24 октября 2013 года выполнялся в условиях, когда критические частоты $f_{0F_2} = 9 \div 10$ МГц были значительно выше частоты волны накачки ($f_{\rm H} < f_{0F_2}$), а эксперимент 25 февраля 2013 года в условияхи $f_{\rm H} \approx f_{0F_2} = 5.7 \div 5.9$ МГц.

На рис. 1*a* показаны высотно-временны́е распределения «сырых» значений концентрации электронов $N_{\rm raw}$ в диапазоне высот 160÷240 км с разрешением по высоте порядка 1,5 км для двух циклов нагрева в период с 14:00 до 15:11 UT. Значения $N_{\rm raw}$ характеризуют мощность обратно рассеянных сигналов радара. Возрастание $N_{\rm raw}$ относительно фона в периоды нагревных циклов указывает на возбуждение усиленных нагревом ионных линий HFIL [2, 43]. Распределения $N_{\rm raw}$ демонстрируют, что не только в моменты включений стенда, но и в течение всей длительности нагревных циклов наблюдалось увеличение мощностей ионных линий $S_{\rm IL}$, что является проявлением параметрических неустойчивостей PDI и/или OTSI. Увеличение мощности $S_{\rm IL}$ 24.10.2013 регистрировалось на постоянных высотах: $h \approx 198$ км в цикле 14:01÷14:06 UT и $h \approx 201$ км в период 15:01÷15:10 UT. Примеры спектров ионных линий $S_{\rm IL}(f)$ в низкочастотном диапазоне в полосе от -20 до +20 кГц показаны на рис. 16 для отдельных моментов времени для высот с максимальными значениями $S_{\rm IL}$. Как видно из рис. 16, в циклах нагрева наблюдалось резкое увеличение смещённых по частоте относительно нуля вверх ($S_{\rm ILU}$) и вниз ($S_{\rm ILD}$) максимумов ионных линий на два–три порядка, а также несмещённого максимума $S_{\rm IL0}$ на порядок относительно фоновых значений 50÷60 отн. ед.

На рис. 1*в* приведена спектрограмма плазменных линий $S_{\rm PL}(t, f)$ — распределение спектральной мощности сигнала радара в высокочастотной области в координатах время—частота, измеренная 24 октября 2013 года в диапазоне частот от 5,1 до 6,2 МГц. Спектрограммы $S_{\rm PL}(t, f)$ рассчитывались в специализированной программе GUISDAP в интервале высот 128÷302 км (Range

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, М. Т. Риетвельд, И. Хаггстром



Рис. 1. Данные наблюдений с радара некогерентного рассеяния EISCAT (930 МГц) в период эксперимента 24.10.2013 по модификации F-области высокоширотной ионосферы мощными радиоволнами на частоте $f_{\rm H} = 5,423$ МГц при $f_{\rm H} < f_{{\rm o}F_2}$. Панель a: высотно-временное распределения $N_{\rm raw}(h,t)$; панель b: спектры $S_{\rm IL}(f)$ для дискретного набора высот в ионосфере и моментов времени; панель b: спектрограмма $S_{\rm PL}(f,t)$ в области высот 128÷302 км ($f_{\rm H}$ отмечено на оси ординат); панель z: спектры $S_{\rm PL}(f)$, частота $f_{\rm H}$ отмечена на оси абсцисс

816

128 \div 302 км). Периоды нагревных циклов и частота волны накачки $f_{\rm H}$ отмечены на осях времени и частоты соответственно. Из рис. 16 следует, что в циклах нагрева инициированные нагревом плазменные линии HFPL формируют на спектрограмме три «трека» повышенной мощности $S_{\rm PL}$. Возрастание мощности $S_{\rm PL}$ наблюдалось на частотах, близких к частоте волны накачки $f_{\rm H}$, а также на частотах, смещённых на $\Delta_1 \approx 0.25$ и $\Delta_2 \approx 0.45$ МГц от частоты $f_{\rm H}$ в сторону увеличения, $f_{\text{PLout}+1} = f_{\text{H}} + \Delta_1$ и $f_{\text{PLout}+2} = f_{\text{H}} + \Delta_2$. При включении нагревного комплекса максимумы мощности $S_{\rm PL}$ также наблюдались на трёх частотах. Примеры спектров плазменных линий $S_{\rm PL}(f)$ показаны на рис. 1r в высокочастотном диапазоне частот от $f_{\rm H} - 0.04~{
m M}$ Гц до $f_H + 0.45~{
m M}$ Гц для фиксированных высот с максимальными значениями мощности $S_{\rm PL}$. Измерения $S_{\rm PL}(f)$ выполнены через 2÷5 мин после начала нагревных циклов в моменты, отмеченные на оси времени спектрограмм (рис. 1в). Проведённый анализ данных наблюдений смещённых спектральных максимумов SpLout+1 и SpLout+2 в различные моменты времени нагревных циклов показал, что оба максимума отвечали одной высоте (в пределах шага интегрирования 3 км). Спектральные мощности смещённых максимумов $S_{\text{PLout}+1}$ и $S_{\text{PLout}+2}$, как правило, превышали мощности максимума S_{PLf_H} вблизи частоты волны накачки. Однако в некоторых сеансах измерений спектральная мощность $S_{\text{PL}f_H}$ была выше, чем мощности $S_{\text{PLout}+1}$ и $S_{\text{PLout}+2}$ (см. спектры в 15:02:40 UT на высоте 201 км).

Для условий близости $f_{\rm H} \approx f_{\rm oF_2}$ на рис. 2 представлены данные измерений радаром некогерентного рассеяния за период 14:46—15:56 UT 25 февраля 2013 года (обозначения на рис. 2 аналогичны рис. 1). Распределения $N_{\rm raw}(t,h)$ (рис. 2*a*) демонстрируют, что в цикле нагрева 14:46— 14:56 UT высоты возбуждения линий HFIL возрастали от 210 до 220 км. В двух других циклах нагрева изменения высот генерации линий HFIL занимали широкую полосу ±6 км в диапазоне от 208 до 220 км. В цикле 15:01—15:11 UT наблюдались «волнообразные» изменения высоты возбуждения линий HFIL. В цикле 15:46—15:56 UT высоты линий HFIL оставались примерно постоянными около 215 км. На рис. 2*6* показаны спектры ионных линий $S_{\rm IL}(f)$ для двух моментов времени, отмеченных на оси времени рис. 2*a*, и для двух высот в ионосфере для каждого момента. Из зависимостей $S_{\rm IL}(f)$ на рис. 2*6* можно видеть, что мощности смещённых максимумов $S_{\rm ILU}$ и $S_{\rm ILD}$ для одного момента времени, но на разных высотах являются сопоставимыми. Отметим также возбуждение «несмещённого» относительно нуля максимума $S_{\rm IL0}$, наиболее выраженного в 15:49:00 UT.

Спектрограмма плазменных линий $S_{\rm PL}(t,f)$ на рис. 26 демонстрирует, что в периоды нагрева максимумы линий HFPL одновременно возбуждались на нескольких частотах. В первом цикле 14:46÷14:56 UT в момент включения 14:46 UT усиление («всплеск» спектральной мощности $S_{\rm PL}$) не регистрировалось, а в течение цикла наблюдался в основном один «трек» около частоты 5,9 МГц, смещённый от частоты $f_{\rm H}$ на $\Delta \approx 0,45$ МГц. В период с 14:46 до 14:56 UT по данным станции вертикального зондирования в г. Тромсё в ионосфере регистрировалось ионосферное поглощение, когда значения минимальных частот на ионограммах возросли с 0,5 до 1,5 МГц и наблюдался спорадический слой $E_{\rm s}$ с критической частотой $f_{{
m o}E_{\rm s}} \approx 3.5~{
m M}$ Гц. Данные явления, возможно, привели к снижению мощности нагревного сигнала на высотах слоя F и к резкому уменьшению интенсивности инициированных плазменных линий около частоты $f_{\rm H}$ в момент включения. В циклах 15:01÷15:11 и 15:46÷15:56 UT при включении нагревного комплекса наблюдались линии HFPL в виде «всплесков» вблизи частоты волны накачки $f_{\rm H}$ и на смещённых частотах около 5,7 и 5,9 МГц. На рис. 2ι показаны примеры спектров плазменных линий $S_{\rm PL}(f)$ для двух моментов времени измерений. В этом эксперименте максимумы $S_{\mathrm{PLout}+1}$, наблюдаемые на частоте, более близкой к частоте волны накачки f_H, формировались на высоте 213 км, в то время как максимумы $S_{\text{PLout}+2}$ регистрировались выше, на высоте 216 км.

Высоты отражения $h_{\rm rfl}$ и верхнего гибридного резонанса $h_{\rm UH}$ по данным радара некогерентно-



Рис. 2. То же, что на рис. 1, для эксперимента 25.02.2013 ($f_{\rm H} \lesssim f_{{\rm o}F_2}$)

го рассеяния 24.10.2013 составляли около 198 км и отличались всего на несколько сотен метров. Они не могли быть разделены для данных радара $S_{\rm PL}(S_{\rm IL})$, проинтегрированных с шагом по высоте 3 км. Для эксперимента 25.02.2013 разница между высотами $h_{\rm rfl}$ и $h_{\rm UH}$ составляла $3\div4$ км и значения $S_{\rm PL}(S_{\rm IL})$ для этих высот определялись в разных высотных интервалах интегрирова-

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, М. Т. Риетвельд, И. Хаггстром

| Таблица 2. Характеристики смещённых плазменных линий (сдвиг частоты спектрального максиму- |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ма в сторону увеличения от частоты нагрева Δf_{exp} и высоты возбуждения $h),$ значения гирочастоты |
| электронов $f_{\rm ce}$ и её пятой гармоники $5f_{\rm ce}$, температура электронов $T_{\rm e}$, а также рассчитанные зна- |
| чения частотного смещения $\Delta f_{ m free}$ и $\Delta f_{ m Bern}$ при нагреве высокоширотной F -области ионосферы на |
| фиксированных частотах 6,77; 6,96 и 7,10 МГц для различных дат и времён наблюдения |

| Дата | $f_{\rm H},$ | Bремя(UT), | h, | $f_{\rm ce},$ | $5f_{\rm ce},$ | $\Delta f_{\rm exp},$ | $\Delta f_{\rm Bern}$, | $T_{\rm e},$ | $\Delta f_{\text{free}},$ |
|------------|--------------|--------------------|----------------|---------------|----------------|-----------------------|-------------------------|--------------|---------------------------|
| | МΓц | ч:мин | KM | ΜГц | МΓц | ΜГц | ΜГц | Κ | ΜГц |
| 7.10.2011 | 6,77 | $14:50 \div 15:45$ | 225 | 1,363 | 6,815 | $0,\!185$ | $0,\!190$ | 4000 | 0,320 |
| 25.02.2013 | 6,77 | $12:16 \div 12:26$ | 218 | 1,363 | 6,815 | 0,190 | $0,\!185$ | 3 0 0 0 | 0,230 |
| 28.10.2015 | 6,77 | $14:00 \div 14:40$ | $226 \div 229$ | 1,360 | 6,800 | $0,\!185$ | $0,\!173$ | 3 700 | 0,330 |
| 02.11.2015 | 6,77 | $13:04 \div 13:06$ | 238 | 1,356 | 6,780 | 0,150 | $0,\!150$ | 3 700 | 0,310 |
| 02.11.2015 | 6,77 | $13:07 \div 13:09$ | 235 | 1,360 | 6,800 | $0,\!155$ | $0,\!147$ | 3 700 | 0,310 |
| 02.11.2015 | 6,77 | $13:10 \div 13:12$ | 222 | 1,367 | 6,835 | 0,200 | 0,202 | 3 700 | 0,310 |
| 02.11.2015 | 6,77 | 13:19÷13:21 | 220 | 1,368 | 6,840 | 0,210 | 0,208 | 3 700 | 0,310 |
| 02.11.2015 | 6,77 | $13:22 \div 13:24$ | 226 | 1,364 | 6,820 | 0,200 | $0,\!190$ | 3700 | 0,310 |
| 26.10.2013 | 6,96 | $12:08 \div 12:10$ | 192/188 | 1,380 | 6,900 | 0,280 | 0,090 | 3 700 | $0,\!297$ |
| 29.10.2013 | 6,96 | $12:08 \div 12:10$ | 196/192 | 1,379 | 6,895 | 0,320 | 0,070 | 3 700 | 0,310 |
| 01.11.2013 | 6,96 | $12:39 \div 12:44$ | 220/215 | 1,366 | 6,830 | 0,150 | 0,030 | 2500 | $0,\!156$ |
| 26.02.2013 | 7,10 | $10:31 \div 10:41$ | 207/203 | 1,372 | 6,860 | 0,200 | -0,200 | 3000 | 0,205 |
| 25.10.2013 | 7,10 | $12:08 \div 12:10$ | 190/186 | 1,382 | 6,910 | 0,350 | -0,050 | 4 0 0 0 | 0,319 |
| 23.10.2014 | 7,10 | $10:16 \div 12:27$ | 240 | 1,356 | 6,780 | 0,200 | -0,200 | 2700 | 0,200 |

ния. Значения $S_{\rm PL}$ на более низкой высоте 213 км 25.02.2013 можно отнести к верхней гибридной высоте, а спектры на высоте 216 км соответствуют области отражения. Следовательно, можно предположить, что максимум $S_{\rm PLout+1}$ возбуждается на верхней гибридной высоте, а $S_{\rm PLout+2}$ — на высоте отражения.

2.2. Результаты наблюдений с помощью радара некогерентного рассеяния EISCAT при фиксированных частотах нагрева 6,77; 6,96 и 7,10 МГц

В нагревных экспериментах при излучении мощных коротких радиоволн на фиксированных частотах $f_{\rm H} = 6,77; 6,96$ и 7,10 МГц на интервалах времени более 30 с также регистрировались эффекты возбуждения плазменных линий на частотах, смещённых относительно частоты $f_{\rm H}$ в сторону увеличения на 0,15÷0,35 МГц. Спектральная ширина плазменных линий составляла около 0,1 МГц. В табл. 2 приведены характеристики смещённых плазменных линий (сдвиг частоты спектрального максимума в сторону увеличения от частоты нагрева $\Delta f_{\rm exp}$, высоты возбуждения h и температура электронов $T_{\rm e}$) по данным радара некогерентного рассеяния, гирочастота электронов и её пятая гармоника ($f_{\rm ce}$ и $5f_{\rm ce}$) по модели [42] для экспериментов, выполненных на указанных частотах в период 2011–2015 годов. В табл. 2 также даны рассчитанные частотные смещения $\Delta f_{\rm free}$ и $\Delta f_{\rm Bern}$, которые обсуждаются в разделе 3. В данной статье рассматриваются эксперименты на частоте $f_{\rm H} = 6,77$ МГц, выполненные в условиях, когда на высотах возбуждения смещённых плазменных линий частота нагрева была ниже частоты пятой гармоники гирочастоты электронов ($f_{\rm H} < 5f_{\rm ce}$) и близка к критической частоте слоя F_2 ($f_{\rm oF2} \lesssim 7$ МГц). Эксперименты на частота $f_{\rm H} = 6,96$ и 7,10 МГц выполнялись в условиях $f_{\rm H} > 5f_{\rm ce}$.

В качестве примера на рис. З представлено поведение во времени усиленных нагревом ионных и плазменных линий по данным наблюдений с помощью радара некогерентного рассеяния 28 октября 2015 года в циклах нагрева 14:01÷14:11 и 14:31÷14:41 UT при $f_{\rm H} = 6,77$ МГц. Критическая



Рис. 3. Данные наблюдений с помощью радара некогерентного рассеяния EISCAT (930 МГц) 28.10.2015 в период эксперимента по модификации *F*-области высокоппиротной ионосферы мощными радиоволнами на частоте $f_{\rm H} = 6,77$ МГц. Панель *a*: распределение $N_{\rm raw}(t,h)$ в диапазоне высот от 140 до 252 км; панель *b*: пространственно-временное распределение максимальных мощностей плазменных линий $S_{\rm PL}(t,h)$; панель *b*: спектрограмма $S_{\rm PL}(f,t)$ (частота $f_{\rm H}$ отмечена стрелкой на оси ординат)

частота ионосферного слоя F_2 в этот период составляла $f_{0F_2} \approx 6.8 \div 6.9$ МГц. На рис. За представлено высотно-временно́е распределение мощностей рассеянных сигналов радара $N_{\rm raw}(t,h)$, отражающих поведение линий HFIL. Высотно-временно́е распределение максимальных значений мощностей инициированных нагревом плазменных линий $S_{\rm PL}(t,h)$, определяемых в интервале частот от 6.25 до 7.25 МГц, показано на рис. Зб. Спектрограмма мощностей плазменных линий $S_{\rm PL}(t,f)$, измеренная в диапазоне высот 128÷302 км, представлена на рис. Зб. Из рис. За и б можно видеть, что при включении нагревного комплекса усиленные и плазменные линии появились на высотах около 240 км, затем в течение первой минуты нагревного цикла происходило сни-

жение высоты их возбуждения примерно на 15 км, что соответствует скорости снижения 250 м/с. Снижение высоты возбуждения линий HFIL и HFPL на нагревном комплексе EISCAT/Heating наблюдалось неоднократно для частот волны накачки вблизи гармоник гирочастоты электронов при высоких эффективных мощностях излучении (450÷750 MBT) и объяснялось возрастанием ионизации (см., например, работы [17, 44, 45]). На комплексе HAARP регистрировался слой дополнительной ионизации, снижающийся по высоте [10, 46–48].

Отметим, что во втором цикле с 14:34:30 до 14:36:30 UT наблюдалось синхронное изменение высот возбуждения линий HFIL и HFPL (рост и последующее понижение), обусловленное естественными вариациями высоты максимума и критических частот слоя F_2 по данным ионозонда вертикального зондирования.

На спектрограмме $S_{PL}(t, f)$ (рис. 3*6*) в циклах нагрева отчётливо наблюдались два «трека» плазменных линий. Первый (максимум S_{PLf_H}), располагался вблизи частоты нагрева, а второй (S_{PLout+}) — на смещённой частоте $f_{PLout+} = f_H + (0,20\div0,25)$ МГц. Мощность смещённых плазменных линий S_{PLout+} была ниже S_{PLf_H} . В середине второго цикла с 14:34:30 до 14:36:30 UT одновременно с изменениями высоты возбуждения ионных и плазменных линий (см. рис. 3*a* и *б*) на спектрограмме (рис. 3*6*) резко снизилась мощность S_{PLout+} и усилилась интенсивность S_{PLf_H} . После 14:37 UT мощности плазменных линий на смещённой частоте f_{PLout+} опять возросли.

На рис. 4 приведены вариации во времени спектральных мощностей плазменных $S_{\rm PL}(t)$ и ионных $S_{\rm IL}(t)$ линий на различных фиксированных высотах, соответствующих максимальным значениям S, по радарным данным 28.10.2015 в циклах $14:01\div14:11$ и $14:31\div14:41$ UT (отмечены на осях времени). Изменения мощностей спектральных максимумов Spi, около частоты волны накачки $S_{\text{PL}f_{\text{H}}}(t)$ показаны на рис. 4a, а для смещённых плазменных линий $S_{\text{PLout}+}(t)$ — на рис. 4b. Из сравнения рис. 4a и δ следует, что максимальные значения S_{PLf_H} наблюдались на более низких высотах (226 км), чем максимальные значения $S_{\text{PLout}+}$ (229÷232 км). В период 14:34:30÷14:36:30 UT вариации высоты максимума и критических частот слоя F2 привели к резкому возрастанию максимальных значений S_{PLf_H} на высоте 232 км. При этом плазменные линии на смещённой частоте $f_{\rm PLout+}$ небольшой интенсивности также возбуждались выше (на высоте 238 км). На рис. 46, г приведены вариации во времени мощностей спектральных максимумов смещённых вверх по частоте ионных линий S_{ILU} и несмещённых (относительно нуля) S_{IL0} на трёх высотах. Отметим, что характер изменения во времени мощностей смещённых вниз по частоте ионных линий $S_{\rm ILD}$ аналогичен вариациям мощностей S_{ILU}. Максимальные значения мощностей ионных линий (S_{ILU} и $S_{\text{IL}0}$) наблюдались на тех же высотах, что и максимальные мощности плазменных линий около частоты волны накачки $S_{PLf_{H}}(t)$.

Рассмотрим результаты эксперимента 2 ноября 2015 года. Нагрев проводился на частоте $f_{\rm H} = 6,77~{\rm M}$ Гц в условиях $f_{\rm H} \approx f_{{\rm o}F_2}~(f_{{\rm o}F_2} \approx 6,8\div6,9~{\rm M}$ Гц). На рис. 5 показаны спектры плазменных линий $S_{\rm PL}(f)$ в трёхмерном виде (время, частота, высота) для трёх высот. Спектры $S_{\rm PL}(f)$ получены в нагревном цикле $13:22\div13:24~{\rm UT}$ с шагом интегрирования по времени 20 с в диапазоне частот от $f_{\rm H}-0,04~{\rm M}$ Гц до $f_{H}+0,23~{\rm M}$ Гц. Рисунок 5 наглядно демонстрирует, что высоты возбуждения смещённых в сторону увеличения от частоты $f_{\rm H}$ на 0,13 МГц спектральных максимумов $S_{\rm PLout+}$ располагались на $3\div6~{\rm KM}$ выше, чем максимум $S_{\rm PL}f_{\rm H}$ около частоты волны накачки $f_{\rm H} = 6,77~{\rm M}$ Гц. Спектральная ширина смещённого по частоте вверх максимума $S_{\rm PLout+}$ составляла величину порядка 0,1 МГц. Вблизи частоты $f_{\rm H}$ спектр $S_{\rm PL}(f)$ имел вид каскадного типа.

Высоты отражения $h_{\rm rfl}$ для данного эксперимента были ниже, чем высота верхнего гибридного резонанса $h_{\rm UH}$. Разность $h_{\rm UH} - h_{\rm rfl}$ увеличивается по мере приближения отношения $f_{\rm H}/f_{\rm oF_2}$ к 1. По радарным данным 2.11.2015 $h_{\rm UH} - h_{\rm rfl} \approx 4 \div 8$ км. Сравнение высот $h_{\rm UH}$ и $h_{\rm rfl}$ и высот возбуждения плазменных линий показывает, что смещённые плазменные линии $S_{\rm PLout+}$ возбуждаются на высотах $h_{\rm UH}$, а плазменные линии вблизи частоты волны накачки $S_{\rm PL}f_H$ — на высоте $h_{\rm rfl}$.

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, М. Т. Риетвельд, И. Хаггстром



Рис. 4. Временны́е вариации во времени максимальных мощностей плазменных $S_{\text{PL}f_{\text{H}}}(a)$, $S_{\text{PLout}+}(b)$ и ионных $S_{\text{ILU}}(a)$, $S_{\text{ILO}}(c)$ линий на фиксированных высотах 28.10.2015 в период эксперимента по модификации F-области высокопиротной ионосферы мощными радиоволнами на частоте $f_{\text{H}} = 6,77 \text{ M}\Gamma$ ц

Результаты анализа экспериментов на частотах нагрева 6,96 и 7,10 МГц показали, что возбуждение смещённых плазменных линий наблюдалось в условиях $f_{\rm H} \approx f_{\rm oF_2}$. В спектре плазменных линий $S_{\rm PL}(f)$ одновременно с плазменными линиями вблизи частоты волны накачки $S_{\rm PL}f_{\rm H}$ регистрировались смещённые плазменные линии $S_{\rm PLout+}$ на частотах $f_{\rm PLout+} = f_{\rm H} + (0,15\div0,35)$ МГц. Ширина смещённых спектральных линий составляла $0,10\div0,15$ МГц. Максимальные значения

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, М. Т. Риетвельд, И. Хаггстром

822



Рис. 5. Спектры плазменных линий в координатах мощность—частота—время на высотах 225; 228 и 231 км, полученные по данным измерений радара 02.11.2015 для нагревного цикла 13:22÷13:24 UT. Мощная радиоволна излучалась на частоте $f_{\rm H} = 6,77~{\rm M}\Gamma{
m q}$

мощностей S_{PLf_H} и S_{PLout+} наблюдались на одной высоте (с точностью высотного разрешения радара 3 км).

2.3. Результаты наблюдений с помощью радара некогерентного рассеяния EISCAT при ступенчатом изменении частоты нагрева в окрестности четвёртой и пятой гармоник гирочастоты электронов

В работах [15–17] представлены результаты комплексных исследований явлений в высокоширотной *F*-области ионосферы, возникающих при воздействии мощных коротких радиоволн с обыкновенной поляризацией, направленных в магнитный зенит, при ступенчатом изменении

частоты волны накачки *J*_H волизи четвертой, пятой и шестой гармоник гирочастоты электронов. В ходе экспериментов, кроме измерений радаром некогерентного рассеяния, осуществлялась регистрация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с помощью радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия, и спектров искусственного радиоизлучения ионосферы в Тромсё. Детальный анализ поведения спектров мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при воздействии на частотах вблизи четвёртой и пятой гармоник гирочастоты электронов выполнен в работах [16, 17].

В данном разделе основное внимание уделено исследованию поведения смещённых плазменных линий в зависимости от близости частоты $f_{\rm H}$ к четвёртой и пятой гармоникам гирочастоты электронов. На рис. 6а, в приведены примеры регистрации инициированных нагревом плазменных линий в виде спектрограмм $S_{\rm PL}(t, f)$. Измерения выполнялись 22 февраля 2012 года в цикле нагрева 15:00 \div 15:18 UT около четвёртой гармоники ($f_{\rm H} \approx 4 f_{\rm ce}$, рис. 6*a*) и 25 октября 2013 года с 14:01 до 14:21 UT вблизи пятой гармоники ($f_{\rm H} \approx 5 f_{\rm ce}$, рис. 6e) гирочастоты электронов. В эксперименте 22 февраля 2012 года частота волны накачки в первые две минуты цикла была равна $f_{\rm H} = 5,3$ МГц, затем каждые 10 с частота нагрева ступенчато (пошагово) увеличивалась на 3,125 кГц от 5,3 до 5,7 МГц. 25 октября 2013 года в цикле нагрева $f_{\rm H}$ пошагово увеличивалась на 5 кГц каждые 20 с в диапазоне частот от 6,700 до 6,995 МГц. Схемы изменения $f_{\rm H}$ в циклах нагрева показаны линиями на спектрограммах. На оси времени треугольниками отмечены времена прохождения частоты нагрева через четвёртую и пятую гармоники гирочастоты электронов. Моменты резонансов $f_{\rm H} \approx 4 f_{\rm ce} = 5,431$ МГц и $f_{\rm H} \approx 5 f_{\rm ce} = 6,845$ МГц определялись по начальному моменту подавления интенсивности главного спектрального максимума (DM-компоненты) в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы. Согласно модели магнитного поля Земли [42], 22 февраля 2012 года условие $4f_{\rm ce} = 5,431~{
m M}$ Гц выполнялось на высоте $h_{
m R} = 225~{
m Km}$ и 25 октября 2013 года условие $5f_{\rm ce} \approx 6,845~{\rm M}$ Гц удовлетворялось на высоте $h_{\rm R} = 207~{\rm km}.$

Рисунок 6a демонстрирует усиление мощностей плазменных волн на частотах, смещённых от частоты $f_{\rm H}$ на 0,25÷0,45 МГц, в период с 15:06 до 15:18 UT. Повышенные значения $S_{\rm PL}$ около 6 МГц как в цикле нагрева, так и вне его на рис. 6a относятся к естественным вариациям интенсивности ленгмюровских волн фоновой плазмы в максимуме слоя F_2 . По данным ионозонда вертикального зондирования в Тромсё 22 февраля 2012 года с 15:00 до 15:30 UT критическая частота этого слоя составляла $f_{\rm oF_2} \approx 6,0\div6,2$ МГц, а высота его максимума $h_{\rm mF_2} \approx 250\div270$ км. Анализ высотного распределения спектров в высокочастотном канале измерений радара некогерентного рассеяния показал, что максимумы фонового усиления плазменных линий $S_{\rm PL}$ на частотах вблизи 6 МГц наблюдались на высотах около 270 км, в то время как инициированные нагревом смещённые плазменные линии (на частотах около 6 МГц) возбуждались на высотах 220÷225 км и имели более высокие значения мощностей.

На рис. 6*6* показана спектрограмма $S_{\rm PL}(t, f)$, измеренная 25 октября 2013 года при ступенчатом изменении частоты $f_{\rm H}$ в окрестности $5f_{\rm ce}$. Во время этого эксперимента критические частоты были высокими: $f_{\rm oF2} \approx 9,0\div9,5~{\rm MF}$ ц. Вид спектрограммы $S_{\rm PL}(t,f)~({\rm puc.}\,66)$ является типичным для всех экспериментов вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов, выполненных с использованием нагревного стенда EISCAT/Heating в условиях $f_{\rm H} < f_{\rm oF2}$. Характерной особенностью в поведении инициированных нагревом плазменных линий при $f_{\rm H} \approx 5f_{\rm ce}$ является наличие на спектрограммах $S_{\rm PL}$ одновременно двух «треков» плазменных линий. Усиленные нагревом плазменные линии возбуждались как около частоты волны накачки ($S_{\rm PL}f_{\rm H}$, так и на частотах $f_{\rm PLout+} = f_{\rm H} + 0,15\div0,25~{\rm MF}$ ц ($S_{\rm PLout+}$). Усиленные мощности $S_{\rm PL}f_{\rm H}$ наблюдались в диапазоне изменений $f_{\rm H} = 6,745\div6,875~{\rm MF}$ ц около пятой гармоники гирочастоты электронов ($5f_{\rm ce} \approx 6,845~{\rm MF}$ ц). На частотах нагрева выше пятой гармоники гирочастоты электронов мощности максимумов $S_{\rm PL}f_{\rm H}$ и $S_{\rm PLout+}$ резко уменьшались, а затем исчезали при $f_{\rm H} > 5f_{\rm ce} + (0,030\div$

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, М. Т. Риетвельд, И. Хаггстром



Рис. 6. Данные наблюдений радара некогерентного рассеяния EISCAT (930 МГц) 22 февраля 2012 г. и 25 октября 2013 г. при ступенчатом изменении частоты нагрева в окрестности четвёртой и пятой гармоник гирочастоты электронов соответственно: спектрограммы плазменных линий (a, время отсчитывается от 15:00:00, e, время отсчитывается от 14:00:00) и спектры плазменных линий для различных моментов времени нагревного цикла (b, z)

 $\div 0,050$) МГц. Отметим, что возбуждение смещённых плазменных линий HFPL_{out+} сопровождалось генерацией более интенсивных усиленных ионно-акустических линий HFIL по сравнению с их интенсивностями в случае, когда регистрировались только линии HFPL_{fH} без линий HFPL_{out+}.

На рис. 66, г показаны примеры спектров плазменных линий $S_{\rm PL}(f)$ в полосе частот шириной до 0,5 МГц для дискретных моментов времени (указанных стрелками на оси времени спектрограмм) и высот в ионосфере с максимальными значениями $S_{\rm PL}$. Текущая частота $f_{\rm H}$ цикла отмечена на оси частот.

Спектры $S_{\rm PL}(f)$ (рис. 66) для эксперимента 22 февраля 2012 года приведены в моменты времени, когда выполнялись условия $f_{\rm H} < 4f_{\rm ce}$ (15:08:30 UT), $f_{\rm H} \approx 4f_{\rm ce}$ (15:09:10 UT) и $f_{\rm H} > 4f_{\rm ce}$ (15:15:00 UT) на высотах 225; 225 и 222 км соответственно. В момент 15:09:10 UT ($f_{\rm H} \approx 4f_{\rm ce}$) в спектре наблюдался максимум с небольшой амплитудой только около частоты нагрева $f_{\rm H}$ ($S_{\rm PL}f_{\rm H}$). Спектральные максимумы вблизи $f_{\rm H}$ в моменты 15:08:30 и 15:15 UT практически не выражены. Для условий $f_{\rm H} < 4f_{\rm ce}$ (15:08:30 UT) отмечалось наличие смещённых максимумов $S_{\rm PLout+}$ на двух частотах ($f_{\rm PLout+} = f_{\rm H} + 0.22$ МГц и $f_{\rm PLout+} = f_{\rm H} + 0.38$ МГц) на высоте 225 км. Максимумы $S_{\rm PLout+}$ на частотах $f_{\rm H} > 4f_{\rm ce}$ в 15:15 UT возбуждались только на одной, более удалённой от $f_{\rm H}$ частоте, и на более низкой высоте 222 км по сравнению с условиями $f_{\rm H} < 4f_{\rm ce}$. Учитывая, что использовался режим ступенчатого повышения частоты волны накачки в цикле нагрева, такой эффект, возможно, объясняется увеличением ионизации на высотах слоя F_2 .

На рис. 6г представлены примеры спектров $S_{\rm PL}(f)$, измеренные 25 октября 2013 года в 14:03:40 и 14:06:40 UT на высотах 213 и 210 км соответственно (для условий $f_{\rm H} < 5f_{\rm ce}$), а также в 14:10:40 UT на высоте $h = h_{\rm R} = 207$ км ($f_{\rm H} \approx 5f_{\rm c}$). При нагреве ионосферы на частотах $f_{\rm H} < 5f_{\rm ce}$ наблюдались максимумы мощности $S_{\rm PL}$ около частоты $f_{\rm H}$ и на смещённой частоте $f_{\rm PLout+} = f_{\rm H} + 0.25$ МГц со спектральной шириной около 0.15 МГц. Спектральная мощность сме-

щённого максимума $S_{\text{PLout}+}$ на частоте $f_{\text{PLout}+}$ ниже мощности $S_{\text{PL}f_{\text{H}}}$. Вблизи частоты нагрева f_{H} в спектре $S_{\text{PL}}(f)$, кроме основного максимума, есть так называемые каскадные плазменные линии. При $f_{\text{H}} \approx 5 f_{\text{ce}}$ в 14:10:40 UT в спектре высокочастотных плазменных волн вблизи частоты f_{H} также регистрировались каскадные линии, но смещённый максимум $S_{\text{PLout}+}$ на частоте $f_{\text{PLout}+}$ отсутствовал. Отметим, что основной спектральный максимум мощности S_{PL} около частоты f_{H} , сдвинутый относительно неё на частоту ионно-акустической волны $f_{\text{IA}} \approx 10$ кГц, свидетельствует о возбуждении «материнской» ленгмюровской волны. Каскадные плазменные линии представляют собой «дочерние» ленгмюровские волны, возбуждаемые на частотах ниже основного спектрального максимума и сдвинутые от частоты f_{H} на частоту $(2n + 1)f_{\text{IA}}$ для $n \geq 1$, где n — номер каскада. Данные, представленные на рис. 6r, аналогично данным на рис. 6d, демонстрируют понижение высоты возбуждения спектральных максимумов $S_{\text{PL}f_{\text{H}}}$ и $S_{\text{PLout}+}$ при приближении частоты накачки «снизу» к пятой гармонике гирочастоты электронов.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Результаты многолетних наблюдений плазменных линий по данным радара некогерентного рассеяния EISCAT (930 МГц), представленные в разделе 2, убедительно продемонстрировали, что, кроме основных спектральных максимумов S_{PLf_H} , расположенных вблизи частоты волны накачки f_H , возбуждались также один или два максимума смещённых плазменных линий S_{PLout+} . В период экспериментов мощная короткая радиоволна с обыкновенной поляризацией излучалась в направлении магнитного зенита циклами с длительностями несколько минут как на фиксированных частотах нагрева ($f_H = 5,423$; 6,770; 6,960; 7,100 МГц), так и при ступенчатом изменении частоты f_H в окрестности четвёртой и пятой гармоник гирочастоты электронов. Эффективная мощность излучения нагревного комплекса EISCAT/Heating составляла $P_{eff} \approx 550\div650$ МВт. Смещённые плазменные линии с максимумом S_{PLout+} , наблюдавшиеся одновременно с основным спектральным максимумом вблизи частоты нагрева, регистрировались на частотах $f_{PLout+} =$ $= f_H + (0,15\div0,45)$ МГц, имели спектральную ширину 0,10÷0,15 МГц, существовали в течение длительного времени воздействия (более 30 с) и сопровождались генерацией интенсивных мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей.

Обобщая результаты наблюдений, выделим основные характеристики и особенности возбуждения смещённых плазменных линий на различных фиксированных частотах волны накачки $f_{\rm H}$. Эксперименты на частоте нагрева $f_{\rm H} = 5,423~{\rm M}$ Гц на высотах возбуждения смещённых плазменных линий соответствовали условиям $f_{\rm H} < 4f_{\rm ce}$ (см. табл. 1). На частоте 6,77 МГц эксперименты проводились в условиях $f_{\rm H} < 5f_{\rm ce}$, на частотах 6,96 и 7,10 МГц — в условиях $f_{\rm H} > 5f_{\rm ce}$ (см. табл. 2).

При частоте волны накачки $f_{\rm H} = 5,423~{\rm MF}$ ц (в условиях $f_{\rm H} < 4f_{\rm ce}$) одновременно могут возбуждаться плазменные линии вблизи частоты волны $f_{\rm H}$ (линии HFPL $_{f_{\rm H}}$ с мощностью $S_{{\rm PL}f_{\rm H}}$), и плазменные линии, смещённые от $f_{\rm H}$ по частоте в сторону увеличения на 0,19÷0,28 и 0,26÷0,45 МГц (линии HFPL_{out+} с мощностями $S_{{\rm PLout+1}}$ и $S_{{\rm PLout+2}}$ соответственно). В ряде случаев линии HFPL $_{f_{\rm H}}$ подавлялись при возбуждении линий HFPL_{out+}. Смещённые максимумы $S_{{\rm PLout+1}}$ и $S_{{\rm PLout+2}}$ регистрировались либо на одной высоте в условиях $f_{\rm H} < f_{{\rm o}F_2}$, либо на разных высотах при $f_{\rm H} \approx f_{{\rm o}F_2}$ (высота максимума $S_{{\rm PLout+1}}$ была на 3÷6 км ниже, чем высота максимума $S_{{\rm PLout+2}}$). Проведённое по данным радара некогерентного рассеяния сопоставление высот отражения $h_{\rm rfl}$ и верхнего гибридного резонанса $h_{\rm UH}$ волны накачки с высотами возбуждений смещённых плазменных линий для условий $f_{\rm H} \leq f_{{\rm o}F_2}$ показало, что максимумы мощности $S_{{\rm PLout+1}}$, смещённые в сторону увеличения частоты от $f_{\rm H}$ на 0,19÷0,28 МГц, наблюдались на высотах верхнего гибридного резонанса, а максимумы мощности $S_{{\rm PLout+2}}$, смещённые на 0,26÷0,45 МГц,

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, М. Т. Риетвельд, И. Хаггстром

регистрировались на высотах отражения волны накачки.

Установлено, что при излучении волны накачки на частоте $f_{\rm H} = 6,77~{\rm M}$ Гц в условиях $f_{\rm H} < 5f_{\rm ce}$ и $f_{\rm H} \approx f_{\rm oF_2}$ одновременно со спектральным максимумом $S_{{\rm PL}f_{\rm H}}$ вблизи частоты нагрева регистрировался один смещённый максимум спектральной мощности $S_{{\rm PLout}+}$ на частоте, сдвинутой относительно $f_{\rm H}$ в сторону увеличения частоты на $0,15\div0,21~{\rm M}$ Гц. По данным радара некогерентного рассеяния для волны накачки с частотой $f_{\rm H} = 6,77~{\rm M}$ Гц, излучаемой вдоль магнитного поля, высоты отражения $h_{\rm rfl}$ располагаются ниже, чем высоты верхнего гибридного резонанса $h_{\rm UH}$. Сравнение высот $h_{\rm rfl}$ и $h_{\rm UH}$ с высотами возбуждения максимумов $S_{\rm PL}f_{\rm H}$ и $S_{\rm PLout+}$ показало, что генерация смещённых плазменных линий происходила на высотах $h_{\rm UH}$, а спектральных линий вблизи частоты нагрева — на высоте $h_{\rm rfl}$.

При нагреве ионосферы на частотах $f_{\rm H} = 6,96$ и 7,10 МГц в условиях $f_{\rm H} > 5 f_{\rm ce}$ наблюдались усиления мощностей плазменной линии вблизи частоты нагрева (максимум $S_{\rm PLf_{\rm H}}$) и максимум $S_{\rm PLout+}$, смещённый по частоте в сторону увеличения от частоты $f_{\rm H}$ на 0,15÷0,35 МГц. Максимальные значения $S_{\rm PLf_{\rm H}}$ и $S_{\rm PLout+}$ регистрировались на одной высоте $h_{\rm rfl}$.

При ступенчатом изменении частоты нагрева в окрестности четвёртого гармоники гирочастоты электронов увеличивались мощности S_{PLout+} смещённых плазменных линий, сдвинутых относительно частоты $f_{\rm H}$ в сторону увеличения на 0,25÷0,45 МГц. Спектральные максимумы вблизи частоты нагрева $S_{\rm PL}f_{\rm H}$ наблюдались только вблизи резонанса $f_{\rm H} \approx 4f_{\rm ce}$. Смещённые плазменные максимумы $S_{\rm PLout+}$ регистрировались для частот нагрева, лежащих как выше, так и ниже частоты $4f_{\rm ce}$, в резонансе $f_{\rm H} \approx 4f_{\rm ce}$ наблюдалось их подавление. При ступенчатом изменении частоты $f_{\rm H}$ в окрестности пятой гармоники на частотах $f_{\rm H} < 5f_{\rm ce}$ наблюдались максимумы плазменных линий около частоты $f_{\rm H}$ и на смещённой частоте $f_{\rm PLout+} = f_{\rm H} + 0,25$ МГц со спектральной шириной 0,15 МГц. Спектральная мощность смещённого максимума $S_{\rm PLout+}$ на частоте $f_{\rm PLout+}$ ниже мощности $S_{\rm PL}f_{\rm H}$. В резонансе $f_{\rm H} \approx 5f_{\rm ce}$ и для частот $f_{\rm H} > 5f_{\rm ce}$ смещённый максимум $S_{\rm PLout+}$ не регистрировался.

Рассмотрим возможные механизмы возбуждения смещённых в сторону увеличения от частоты волны накачки плазменных линий.

Возбуждение смещённых плазменных линий может быть объяснено на основе численных расчётов, проведённых с учётом дисперсии ленгмюровской волны в плазме с конечной температурой электронов [23, 31].

Дисперсионное уравнение для плазменной частоты волны Ленгмюра имеет вид

$$f^{2} = f_{\rm pe}^{2} + f_{\rm ce}^{2} \sin^{2} \theta + \frac{3\mathbf{k}^{2}\kappa T_{\rm e}}{(2\pi)^{2}m_{\rm e}},\tag{1}$$

где $f_{\rm pe}$ — плазменная частота ионосферы, $f_{\rm ce}$ — гирочастота электронов, θ — угол между направлением магнитного поля и волной, \mathbf{k} — волновой вектор ленгмюровской волны, κ — постоянная Больцмана; $T_{\rm e}$ и $m_{\rm e}$ — температура и масса электронов соответственно. Для радара EISCAT на частоте 930 МГц k = 38,23 м⁻¹. Смещение ленгмюровской волны относительно частоты нагрева определяется как $\Delta f_{\rm free} = f - f_{\rm H}$.

Другой возможный механизм возбуждения смещённых плазменных линий вследствие четырёхволнового процесса взаимодействия был рассмотрен в работе [17]. Плазменная волна с частотой f_{PLout+} формируется в области возбуждения параметрической распадной неустойчивости при взаимодействии волн Бернштейна с частотой f_{B} , ионосферных плазменных волн с частотой f_{pe} и верхнегибридных волн с частотой f_{UH} , возбуждаемых вследствие трансформации мощной короткой радиоволны.

Для четырёх частот высокочастотных волн Бернштейна $f_{\rm B} = n f_{\rm ce}$, верхнегибридной частоты $f_{\rm UH} = \sqrt{f_{\rm pe}^2 + f_{\rm ce}^2}$, плазменной частоты $f_{\rm pe}$ и смещённой частоты $f_{\rm PLout+}$ выполняется соотноше-

ние

$$f_{\rm B} + f_{\rm UH} = f_{\rm pe} + f_{\rm PLout+}.$$
 (2)

Условие волнового синхронизма имеет вид

$$\mathbf{k}_{\mathrm{B}} - \mathbf{k}_{\mathrm{pe}} = \mathbf{k}_{\mathrm{PLout}+} - \mathbf{k}_{\mathrm{UH}}$$
или $\mathbf{k}_{\mathrm{B}} + \mathbf{k}_{\mathrm{UH}} = \mathbf{k}_{\mathrm{pe}} + \mathbf{k}_{\mathrm{PLout}+},$ (3)

где $\mathbf{k}_{\rm pe}$, $\mathbf{k}_{\rm PLout+}$ — волновые векторы продольных ионосферных плазменных волн, а $\mathbf{k}_{\rm B}$ и $\mathbf{k}_{\rm UH}$ — волновые векторы поперечных магнитному полю бернштейновских и верхнегибридных волн соответственно. Численные оценки смещения по частоте плазменных линий с использованием выражения (2) $\Delta f_{\rm Bern} = f_{\rm PLout+} - f_{\rm H}$ при ступенчатом изменении частоты нагрева вблизи пятой гармоники гирочастоты электронов, проведённые в работе [17], показали приемлемое соответствие с наблюдаемыми смещениями по частоте максимумов возбуждаемых плазменных линий.

В табл. 1 и 2 сведены результаты расчётов смещений $\Delta f_{\rm free}$ и $\Delta f_{\rm Bern}$, выполненных с использованием выражений (1) и (2) для нагревных экспериментов при фиксированных частотах волны накачки 5,423; 6,770; 6,960 и 7,100 МГц, когда одновременно возбуждались плазменные волны вблизи частоты волны накачки и на одной или двух частотах, смещённых от неё в сторону увеличения. Как ранее отмечалось, в табл. 1 и 2 приведены также экспериментальные значения сдвигов по частоте смещённых плазменных линий $\Delta f_{\rm exp}$ по данным радара некогерентного рассеяния. Представлены также параметры, использованные в вычислениях: высоты регистрации эффекта h и значения температуры электронов $T_{\rm e}$, полученные по экспериментальным данным радарных измерений, частоты $f_{\rm ce}$ и $nf_{\rm ce}$ (n = 4, 5) на высоте h согласно [42].

Сравнение наблюдаемых смещений частот Δf_{\exp} и численных оценок Δf_{free} и Δf_{Bern} , представленных в табл. 1 и 2, показывает следующее. Для частоты $f_{\rm H} = 5,423~{\rm M}$ Гц (при условии $4f_{\rm ce} - f_{\rm H} \approx 5 \div 115~{\rm k}$ Гц) возможна регистрация двух смещённых максимумов. Наблюдается приемлемое соответствие между экспериментальными значениями Δf_{\exp_1} и численными оценками $\Delta f_{\rm Bern}, (\Delta f_{\exp_1} = 0,20 \div 0,28~{\rm M}$ Гц и $\Delta f_{\rm Bern} = 0,19 \div 0,28~{\rm M}$ Гц), а большее смещение Δf_{\exp_2} находится в согласии с оценкой $\Delta f_{\rm free}$ ($\Delta f_{\exp_2} = 0,35 \div 0,45~{\rm M}$ Гц, $\Delta f_{\rm free} = 0,35 \div 0,445~{\rm M}$ Гц). Для частоты $f_{\rm H} = 6,77~{\rm M}$ Гц ($5f_{\rm ce} - f_{\rm H} \approx 10 \div 70~{\rm k}$ Гц) при условиях $f_{\rm H} \leq f_{\rm o}F_2$, можно видеть согласие между экспериментально измеренными смещениями частоты $\Delta f_{\rm exp} = 0,15 \div 0,21~{\rm M}$ Гц и численными оценками $\Delta f_{\rm Bern} = 0,147 \div 0,208~{\rm M}$ Гц. На частотах накачки 6,96 и 7,1~{\rm M}Гц ($f_{\rm H} - 5f_{\rm ce} \approx 60 \div 320~{\rm k}$ Гц) наблюдаемые смещения частоты $\Delta f_{\rm exp} = 0,15 \div 0,35~{\rm M}$ Гц оценками $\Delta f_{\rm free} = 0,156 \div 0,319~{\rm M}$ Гц.

На рис. 7 представлены зависимости экспериментальных значений $\Delta f_{\rm exp}$ и численных оценок смещений по частоте плазменных линий $\Delta f_{\rm Bern}$ от высоты возбуждения для экспериментов, выполненных на частотах нагрева 5,423 МГц (рис. 7*a*) и 6,77 МГц (рис. 7*b*). Сопоставление экспериментальных и численных оценок смещений по частоте, учитывающих влияние волн Бернштейна, показывает их удовлетворительное соответствие.

Представляет интерес сравнить ранее опубликованные результаты наблюдений смещённых плазменных линий в экспериментах на коротковолновом нагревном комплексе EISCAT/Heating [11, 14] с численными оценками смещений по частоте плазменных линий, полученных с использованием выражений (1) и (2). Эксперименты в работах [11, 14] выполнялись при вертикальном излучении волны накачки короткими циклами нагрева с частотами, близкими к третьей и четвёртой гармоникам гирочастоты электронов. В эксперименте при нагреве *F*-области высокопиротной ионосферы с частотой 4040 МГц ($f_{\rm H} \approx 3 f_{\rm ce}$) 17 августа 1986 года в 10:29:10 UT регистрировались два максимума, смещённые в сторону увеличения частоты относительно $f_{\rm H}$ на $\Delta f_{\rm exp} \approx 0,276$ и 0,166 МГц [11]. Численные расчёты смещений частот плазменных линий при



Рис. 7. Зависимости экспериментальных значений $\Delta f_{\rm exp}$ и численных оценок смещений по частоте плазменных линий $\Delta f_{\rm Bern}$ от высоты возбуждения: для частоты нагрева 5,423 МГц (*a*); 6,77 МГц (*b*)

использовании выражений (1) и (2) дают оценки $\Delta f_{\rm free} \approx 0,23$ МГц и $\Delta f_{\rm Bern} \approx 0,165$ МГц соответственно, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями. При нагреве на частоте $f_{\rm H} = 5,370$ МГц ($f_{\rm H} \approx 4 f_{\rm ce}$) 13 июня 1998 года в период с 06:32:00 до 06:37:30 UT также регистрировались два максимума плазменных линий, смещённых по частоте на $\Delta_{\rm exp} \approx 0,025$ МГц и $\Delta_{\rm exp} \approx 0,017$ МГц [14]. В результате вычислений с применением выражений (1) и (2) получены оценки $\Delta f_{\rm free} \approx 0,0225$ МГц и $\Delta f_{\rm Bern} \approx 0,017$ МГц, сравнимые с экспериментально наблюдаемыми смещениями частот.

Сопоставление экспериментальных значений $\Delta f_{\rm exp}$ и численных оценок смещений частоты плазменных линий $\Delta f_{\rm Bern}$ и $\Delta f_{\rm free}$ с высотами отражения $h_{\rm rfl}$ и верхними гибридными высотами $h_{\rm UH}$ для мощной короткой радиоволны позволяет предположить следующее:

1) на высоте отражения $h_{\rm rfl}$ возбуждение смещённых плазменных линий может быть объяснено дисперсионными свойствами ленгмюровской волны в плазме при учёте конечной температуры электронов;

2) на высотах $h_{\rm UH}$ верхнего гибридного резонанса смещённые плазменные линии образуются при взаимодействии волн Бернштейна, ионосферных плазменных и верхнегибридных волн, возбуждаемых вследствие трансформации волны накачки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гуревич А.В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1 145.
- 2. Robinson T. R. // Phys. Rep. 1989. V. 179, No. 2–3. P. 79.
- 3. Stubbe P., Kopka H. // Radio Sci. 1983. V. 18, No. 6. P. 831.
- 4. Kuo S. P., Lee M. C. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, No. A01. Art. no. A01309.
- 5. Stubbe P. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58, No. 1–4. P. 349.
- 6. Fejer J. A. // Rev. Geophys. Space Phys. 1979. V. 17, No. 1. P. 135.
- 7. Kuo S., Lee M., Kossey P. // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24, No. A10. P. 2969.
- Грач С. М., Караштин А. Н., Митяков Н. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 12. С. 1827.
- Васьков В. В., Гуревич А. В. Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 818.

Т. Д. Борисова, Н. Ф. Благовещенская, М. Т. Риетвельд, И. Хаггстром

- Грач С. М., Сергеев Е. Н., Мишин Е. В., Шиндин А. В. // Успехи физ. наук. 2016. Т. 186, № 11. С.1 189.
- 11. Isham B., Kofman V., Hagfors T., et al. // Radio Sci. 1990. V. 25, No. 3. P. 251.
- 12. Stubbe P., Kohl H., Rietveld M. T. // J. Geophys. Res. 1992. V. 97, No. A5. P. $6\,285.$
- 13. Isham B., La Hoz C., Kohl H., et al. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58, No. 4. P. 369.
- Djuth F. T., Isham B., Rietveld M. T., et al. // J. Geophys. Res. 2004. V. 109, No. A11. Art. no. A11307.
- Борисова Т. Д., Благовещенская Н. Ф., Калишин А. С. и др. // Электромагнитные методы исследования окружающего пространства. Сб. тез. докл. Первой украинской конференции. Харьков, 25–27 сентября 2012 г. С. 227.
- Борисова Т. Д., Благовещенская Н. Ф., Калишин А. С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 1. С. 1.
- Борисова Т. Д., Благовещенская Н. Ф., Калишин А. С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 8. С. 623.
- 18. Feier J. A., Sulzer M. P., Djuth F. T. // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, No. A9. P. 15,985.
- 19. Sulzer M. P., Fejer J. A. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, No. A8. P. 15,035.
- 20. Rietveld M. T., Isham B., Kohl H., et al. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, No. A4. P. 7 429.
- 21. Cheung P. Y., DuBois D. F., Fukuchi T., et al.// J. Geophys. Res. 1992. V. 97, No. A7. P. 10575.
- Watanabe N., Golkowski M., Sheerin J. P., Watkins B. J. // Earth Moon Planets. 2015. V. 116, No. 1. P. 89.
- 23. DuBois D.F., Rose H.A., Russell D. // J. Geophys. Res. 1990. V. 95, No. A12. P. 21,221.
- Борисова Т. Д., Благовещенская Н. Ф., Йоман Т. К., Хаггстром И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 4. С. 305.
- 25. Kuo S. P., Lee M. C. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, No. A1. Art. no. A01309.
- 26. DuBois D. F., Russell D. A., Cheung P. Y., Sulzer M. P. // Phys. Plasmas. 2001. V. 8, No. 3. P. 791.
- 27. Захаров В. Е. // Журн. экспер. теор. физ. 1972. Т. 62, вып. 5. С. 1745.
- 28. Fejer J., Kuo Y. Y. // Phys. Fluids. 1973. V. 16, No. 9. P. 1490.
- 29. DuBois D., Rose H.A., Russell D. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61, No. 19. P. 2 209.
- 30. Najmi A., Eliasson B., Shao X., et al. // Phys. Plasmas. 2017. V. 24, No. 10. Art. no. 102904.
- 31. Akbari H., Bhatt A., La Hoz C., Semeter J. // Space Sci. Rev. 2017. V. 212, No. 1–2. P. 249.
- 32. Djuth F. T., DuBois D. F // Earth Moon Planets. 2015. V. 116, No. 1. P. 19.
- 33. Mishin E., Hagfors T., Kofman W. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, No. A12. P. 27,265.
- Стародубцев М. В., Назаров В. В., Костров А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 881.
- Starodubtsev M. V., Nazarov V. V., Gushchin M. E., Kostrov A. V. // J. Geophys. Res. 2016. V. 121, No. 10. P. 10481.
- 36. Rietveld M. T., Senior A., Markkanen J., Westman A. // Radio Sci. 2016. V. 51, No. 9. P. 1533.
- 37. Rishbeth H., van Eyken T. // J. Atmos. Terr. Phys. 1993. V. 55, No. 4–5. P. 525.
- 38. Lehtinen M. S., Huuskonen A. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58, No. 1–4. P. 435.
- 39. Greenwald R. A., Baker K. B., Dudeney J. R., et al. // Space Sci. Rev. 1995. V. 71, No. 1–4. P. 761.
- 40. http://dynserv.eiscat.uit.no/TR/
- 41. Stubbe P., Kohl H., Rietveld M. T. // J. Geophys. Res. 1992. V. 79, No. A5. P. 6 285.
- 42. DGRF/IGRF Geomagnetic Field Model 1900–2015 and Related Parameters.
- 43. Stubbe P. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58, No. 1–4. P. 349.
- 44. Dhillon R. S., Robinson T. R. // Ann. Geophys. 2005. V. 23, No. 1. P. 75.
- 45. Ashrafi M., Kosch M.J., Kaila K., Isham B. // J. Geophys. Res. 2007. V.112, No. A5. Art. no. A05314.

- Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., et al. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37, No. 2. Art. no. L02106.
- 47. Sergeev E., Grach S., Shindin A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110, No. 6. Art. no. 065002.
- Mishin E., Watkins B., Lehtinen N., et al. // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2016. V. 121, No. 4. P. 121.

Поступила в редакцию 11 апреля 2017 г.; принята в печать 30 октября 2018 г.

OUTSHIFTED PLASMA LINES OBSERVED IN HEATING EXPERIMENTS IN THE HIGH-LATITUDE IONOSPHERE AT PUMP FREQUENCIES NEAR ELECTRON GYROHARMONICS

T. D. Borisova, N. F. Blagoveshchenskaya, M. T. Rietveld, and I. Häggström

We present experimental results concerning the features and origin of the outshifted plasma lines in the high-latitude ionospheric F region, which are excited by O-mode high-power HF radio waves radiated by the EISCAT/Heating facility at pump-wave frequencies near the fourth and fifth harmonics of electron gyrofrequency. HF pump waves were transmitted towards the magnetic zenith during long-lasting heater-on cycles (2–20 min). The studies were carried out using the measurement data obtained by the EISCAT UHF incoherent scatter radar in Tromsø (the radar operating frequency 930 MHz). The analysis of the EISCAT UHF radar data has demonstrated the simultaneous excitation of several plasma lines at frequencies close to the pump frequency and at frequencies shifted upwards by 0.15–0.45 MHz on long-lasting time intervals (more than 30 s). The spectral width of the outshifted plasma lines was 0.10–0.15 MHz. The features of their occurrence were analyzed as functions of the relation between the pump wave frequency or gyroharmonics and the proximity of the pump-wave frequency to the cutoff frequency of the ionospheric F_2 layer. The plausible excitation mechanisms of outshifted plasma lines are discussed. Comparison between the experimental data and calculation results concerning the features of outshifted plasma lines for different pump-wave frequencies was made.