

УДК 533.951+537.868

ЗОНДИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЁННОЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ НАГРЕВНОГО СТЕНДА «СУРА» ИОНОСФЕРЫ СИГНАЛАМИ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ СИСТЕМЫ GPS

*В. Л. Фролов¹, Г. П. Комраков¹, В. Е. Кунницын², А. М. Падохин²,
А. Е. Васильев², Г. А. Курбатов²*

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород,

² Московский госуниверситет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

В работе приведены результаты экспериментальных исследований свойств возмущений плотности плазмы, создаваемых при нагреве F_2 -области ионосферы мощными короткими радиоволнами, излучаемыми нагревным стендом «Сура» (ФГНУ НИРФИ, г. Нижний Новгород). Особенностью этих экспериментов являлось то, что они проводились в освещённой Солнцем (дневной) ионосфере, когда генерация искусственной ионосферной турбулентности имеет специфические особенности, а уровень интенсивности турбулентности достаточно низкий. При зондировании индуцированных мощным коротковолновым радиоизлучением возмущений концентрации плазмы использовались сигналы навигационных спутников системы GPS, лучи зрения на которые пересекали различные части возмущённой области ионосферы. Для искусственных вариаций концентрации плазмы определены пороговые мощности их возбуждения, а также пространственные, временные, спектральные и энергетические характеристики генерируемых возмущений.

ВВЕДЕНИЕ

Широкомасштабные исследования свойств искусственной ионосферной турбулентности, возбуждаемой в F_2 -области ионосферы при воздействии на неё мощными короткими радиоволнами обыкновенной поляризации (см., например, статьи в специальных выпусках журналов [1–8] и обзоры [9–14], а также цитируемую в них многочисленную литературу), позволили установить, что, помимо обычного омического нагрева ионосферной плазмы, вблизи уровня отражения мощной радиоволны развиваются стрикционная параметрическая, тепловая (резонансная) параметрическая и самофокусирующая неустойчивости. Это приводит, в частности, к сильному разогреву в этой резонансной области электронов и генерации искусственных неоднородностей плотности плазмы в диапазоне масштабов от долей метра до десятков километров, которые оказывают существенное влияние на свойства распространяющихся через возмущённую область ионосферы КВ, УКВ и дециметровых радиоволн. В условиях средних широт характеристики этих неоднородностей изучались методами ракурсного рассеяния радиоволн КВ и УКВ диапазонов [1, 9, 15], просвечивания возмущённой области сигналами низкоорбитальных спутников [1, 9], с помощью спутниковой радиотомографии [13, 16] и др. В последнее время получили развитие методы зондирования возмущённой области радиосигналами навигационных спутников систем GPS/ГЛОНАСС на частотах в диапазоне $1,2 \div 1,6$ ГГц [17–19] и прямые измерения свойств плазменной турбулентности бортовой аппаратурой спутников, пролетающих через возмущённую силовую магнитную трубку, опирающуюся на область генерации интенсивной искусственной ионосферной турбулентности вблизи уровня отражения мощной радиоволны [20, 21]. Эти измерения, дав новую важную информацию об индуцированных мощной радиоволной плазменных возмущениях, выявили ряд актуальных проблем, среди которых одной из наиболее важных является вопрос о структуре возмущённой области ионосферы. Как оказалось, свойства плазменных возмущений в значительной

степени зависят от места их расположения в возмущённой области ионосферы, геофизических условий и режимов излучения волны накачки.

В настоящей работе представлены результаты изучения характеристик искусственных вариаций плотности плазмы в возмущённой области ионосферы, полученные при её зондировании сигналами навигационных спутников системы GPS. Отличием обсуждаемых в настоящей статье экспериментов являлось то, что они проводились в дневной ионосфере, когда генерация искусственной ионосферной турбулентности имеет специфические особенности и уровень интенсивности турбулентности достаточно низкий. Использование в измерениях сигналов от трёх спутников позволило также провести диагностику различных частей возмущённой области ионосферы в разное время дня. Эксперименты были выполнены в марте 2009 года на стенде «Сура» (ФГНУ НИРФИ, г. Нижний Новгород; координаты стенда: $\varphi = 56,15^\circ$ с. ш.; $\lambda = 46,1^\circ$ в. д.) и явились продолжением ранее начатых на стенде исследований [17], в ходе которых в условиях ночной ионосферы были измерены характеристики образующейся при её нагреве полости с пониженной концентрацией плазмы вблизи высоты отражения мощной радиоволны и особенности неоднородной структуры ионосферы в области магнитного зенита.

В первом разделе статьи представлено описание экспериментов, а также методов регистрации и обработки полученных экспериментальных данных. Обсуждение полученных результатов составляет содержание второго раздела. В третьем разделе сформулированы выводы, следующие из результатов измерений, представлена возможная интерпретация наблюдаемых явлений и сделаны некоторые заключительные замечания.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Обсуждаемые в работе эксперименты выполнялись в период с 12 по 19 марта 2009 года в условиях низкого уровня геомагнитной активности ($K_p = 0 \div 3$). Критические частоты F_2 -области ионосферы f_{0F_2} не превышали, как правило, 5 МГц даже в полуденные часы. При наименьшей частоте излучения стенда $f_0 = 4,3$ МГц, которая использовалась во всех сеансах модификации ионосферы данного цикла экспериментов, это определяло возможный интервал времени их проведения с 08:00–09:00 до 17:00–18:00 MSK, что соответствовало условию освещённой Солнцем ионосферы. При этом, как известно, эффективность возбуждения искусственной турбулентности оказывается заметно ниже, чем в поздние вечерние или ночные часы, когда, в частности, на стенде «Сура» были выполнены измерения, описанные в работе [17]. Здесь сказывается влияние нескольких факторов. Во-первых, это поглощение энергии волны накачки в нижней ионосфере (в областях D и E), которое по оценкам могло в нашем случае составлять $2 \div 3$ дБ в утренние и вечерние часы и доходить до $6 \div 7$ дБ в полуденные часы, и, следовательно, более низкая плотность потока электромагнитной энергии на высотах верхней ионосферы. Исходя из этого, при эффективной мощности излучения волны накачки стендом $P_{эфф} = 80$ МВт на частоте $f_0 = 4,3$ МГц приведённый уровень транспортируемой в F_2 -область мощности излучения не превышал 40 МВт в утренние и вечерние часы наблюдений и 20 МВт — в дневные. Во вторых, при $P_{эфф} \geq 50$ МВт нагрев ионосферы в дневных условиях приводит к образованию дефокусирующей линзы на высотах $130 \div 180$ км [22], вызывающей расширение диаграммы направленности излучения и, следовательно, уменьшение плотности потока энергии мощной радиоволны в пределах главного лепестка диаграммы на высотах F_2 -области. В-третьих, это, как правило, достаточно небольшие днём высоты отражения мощной радиоволны $h \approx 200$ км, на которых по сравнению с высотами $h \geq 250$ км, характерными для вечерних часов наблюдений, имеет место лишь незначительное изменение концентрации плазмы при её нагреве мощной радиоволной [23]. В-четвёртых, это отсутствие в

спокойной дневной среднеширотной ионосфере развитых плазменных возмущений естественного происхождения и, как следствие, более низкая эффективность возбуждения искусственной ионосферной турбулентности. Наконец, в-пятых, это увеличение порогов развития параметрических неустойчивостей при наличии интенсивного потока энергичных фотоэлектронов.

В обсуждаемых в работе экспериментах все измерения проводились с использованием обыкновенной моды излучения мощной радиоволны, обеспечивающей эффективное возбуждение искусственной ионосферной турбулентности за счёт резонансного взаимодействия волны накачки с плазмой [12]. В большинстве случаев измерения выполнялись при синхронной работе всех трёх модулей стенда, что обеспечивало $P_{эфф} \approx 80$ МВт, за исключением двух сеансов, когда для модификации ионосферы использовались только два модуля и эффективная мощность излучения волны накачки составляла $P_{эфф} \approx 40$ МВт. Здесь мощности приводятся без учёта поглощения в нижних слоях ионосферы; если такое поглощение учитывается, то в тексте это специально отмечается. Диаграмма направленности излучения в случае когерентного излучения всех трёх модулей стенда имела карандашную форму. Её ширина составляла порядка 12° и 20° по уровням излучения 0,5 и 0,1 от максимальной мощности P_0 соответственно. В случае использования двух модулей стенда для указанных выше двух уровней мощности ширина диаграммы направленности была порядка 18° и 30° по линии север—юг при неизменной её ширине по линии восток—запад. Для увеличения эффективности возбуждения искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта магнитного зенита [12] луч антенны стенда был наклонён на 12° на юг в плоскости геомагнитного меридиана. При этом для близких к оси диаграммы направленности лучей, с учётом их рефракции в ионосфере, мощная радиоволна на частоте $f_0 \approx 4,3$ МГц распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля в области своего взаимодействия с плазмой на уровне верхнегибридного резонанса, обеспечивая наиболее эффективный её нагрев. Будем называть эту область магнитным зенитом для волны накачки. В условиях выполняемых экспериментов размер возмущённой области по уровню $0,1P_0$ на высоте порядка 200 км, что приблизительно соответствовало высотам отражения волны накачки во время проведения измерений, составлял примерно 70 км в диаметре с координатами центра $\varphi = 54,6^\circ$ с. ш. и $\lambda = 45,6^\circ$ в. д. Измерения проводились, если $f_{0F_2} \geq 4,3$ МГц, и луч зрения на какой-либо из спутников пересекал соответствующую область. Величина f_{0F_2} во время измерений контролировалась с помощью имеющейся на стенде «Сура» ионосферной станции вертикального зондирования. В экспериментах использовалось циклическое излучение волны накачки в следующих режимах: 30 с — излучение, 30 с — пауза (+30 с; -30 с); (+3 мин; -3 мин); (+5 мин; -5 мин); (+10 мин, -5 мин). Поскольку спутники GPS движутся достаточно медленно по небосводу (линейная скорость их перемещения, отнесённая к высоте $h = 200$ км, составляет примерно 1,75 км/мин), луч зрения на спутник находился в пределах диаграммы направленности излучающей антенны стенда по уровню $0,1P_0$ в течение 30÷60 мин, и по результатам измерений имелась возможность получать информацию как о пространственных, так и о временных характеристиках возмущений плотности плазмы, вызванных нагревом ионосферы мощной радиоволной.

На рис. 1 для 19 марта 2009 года приведены траектории сечения возмущённой области на высоте 200 км лучом зрения на спутники GPS 20, GPS 22 и GPS 32. Для GPS 20 траектория пересекала возмущённую область в ранние вечерние часы приблизительно с северо-запада на юг, проходя через западную и южную её части и достаточно близко от области магнитного зенита для волны накачки. Для GPS 22 траектория пересекала возмущённую область в предполуденные часы приблизительно с юго-запада на северо-восток, проходя практически через область магнитного зенита для волны накачки. Для GPS 32 траектория пересекала возмущённую область в послеполуденные часы приблизительно с северо-запада на восток, проходя через её северо-восточную часть. Траектории сохраняют свой вид и для других дней наблюдений, смещаясь приблизительно

на 4 мин на более раннее время за каждые прошедшие сутки. В статье при представлении данных мы будем использовать время UT, которое для периода рассматриваемых в работе экспериментов было меньше на 3 часа декретного московского времени (MSK). На рис. 1 положение стенда «Сура» отмечено точкой; линия окружности определяет контур диаграммы направленности по уровню $0,1P_0$, рассчитанной для синхронного излучения всех трёх модулей стенда.

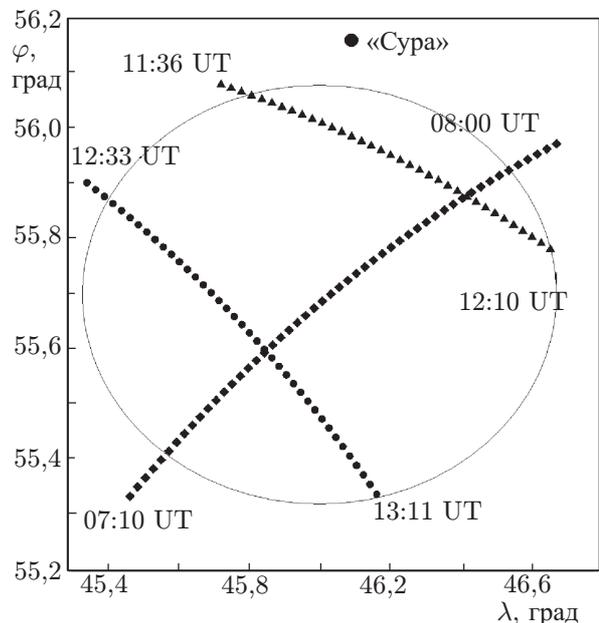


Рис. 1. Траектории пересечения возмущённой области на высоте 200 км лучами зрения на используемые в измерениях спутники GPS 20 (●), GPS 22 (■), GPS 32 (▲)

статочны знания вариаций полного электронного содержания. Из полученных временных рядов N_{tot} с использованием метода скользящего среднего с окном 20 мин удалялся средний тренд, после чего выделенные вариации ПЭС (\tilde{N}_{tot}) исследовались с помощью вейвлет-анализа с целью выявления в них наличия периодических сигналов (далее — периодик) и времени их существования, а также соответствия их характеристик режимам работы стенда «Сура». Для этого с использованием стандартной процедуры строились оценки локального спектра энергии $S(a_i, b_j)$, который отвечает распределению энергии сигнала по временным масштабам вариаций измеряемой величины ПЭС, отнесённых к определённому времени их регистрации:

$$S(a_i, b_j) = |W(a_i, b_j)|^2,$$

$$W(a_i, b_j) = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{N}_{tot}(t_k) \psi^* \left(\frac{t_k - b_j}{a_i} \right) / \sum_{k=0}^{N-1} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t_k - b_j}{a_i} \right)^2 \right].$$

Здесь a_i — аналог периода, b_j — аналог времени, $\psi(t)$ — родительская функция вейвлета. При анализе полученных данных использовался вейвлет Морле:

$$\psi(t) = \exp(-t^2/2) \exp(i 2\pi t),$$

который имеет простой вид и адекватен решению поставленных задач.

Приём сигналов навигационных спутников системы GPS осуществлялся с помощью двухчастотного приёмника JAVAD LEXON, развёрнутого на территории стенда «Сура». Частота дискретизации при регистрации данных составляла 10 Гц. Для анализа брались фазовые данные, получаемые на обеих частотах сигналов спутника GPS: 1 575,42 МГц (канал L1) и 1 227,6 МГц (канал L2), которые использовались для вычисления относительного наклонного полного электронного содержания N_{tot} (или ТЕС — total electron content в английской транскрипции) по лучу спутник—приёмник:

$$N_{tot} = \left(\frac{L_1}{f_1} - \frac{L_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{c}{K} + \text{const},$$

где коэффициент $K = 40,308 \text{ м}^3/\text{с}^2$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ — скорость света в вакууме. Вычисления абсолютной величины N_{tot} с использованием, например, групповых данных P1 и P2, не проводились, поскольку для изучения характеристик возмущений, вызванных нагревом ионосферы, было достаточно знания вариаций полного электронного содержания.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Всего за время экспериментов в 14 сеансах измерений были получены данные, заведомо показавшие появление в нагретой мощной короткой радиоволной ионосфере искусственных возмущений плотности плазмы. Краткое описание полученных в них результатов представлено в [24]. В табл. 1 приведены условия проведения всех этих сеансов и дана общая характеристика наблюдаемых в них явлений. В первом столбце указан номер сеанса. Во втором столбце приведены дата сеанса и время его проведения. В третьем приводятся сведения о частоте волны накачки (ВН), её эффективной мощности и режиме излучения. В четвёртом столбце приведены значения критической частоты F_2 -области ионосферы (f_{0F_2}), высоты отражения волны накачки и уровня геомагнитной активности, определяемого индексом K_p . В пятом столбце указаны номер спутника и направление траектории пересечения возмущённой области (ВО) лучом зрения на него, а также время прохождения луча зрения на спутник через область магнитного зенита для волны накачки (МЗВН) или время наибольшего сближения траектории луча зрения на спутник с этой областью, если траектория проходила мимо, но достаточно близко от неё. В шестом столбце кратко перечислены наблюдаемые эффекты и величины вариаций ПЭС. В седьмом столбце приведены комментарии по условиям наблюдений и отмечен уровень искусственной диффузности на ионограммах во время работы стенда, который может приближённо характеризовать интенсивность возбуждаемых нагревом ионосферы крупномасштабных неоднородностей плотности плазмы с характерным масштабом поперёк магнитного поля $l_{\perp} \geq 1$ км.

Как нетрудно видеть, измерения проводились в условиях низкого и умеренного уровня геомагнитной активности с $K_p \leq 3$. Высоты отражения мощной радиоволны были в пределах $190 \div 210$ км. Величина вариаций ПЭС составляла в среднем $\pm 0,5$ TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$), которые были значительно меньше значений $0,2 \div 0,4$ TECU, полученных ранее на стенде «Сура» в экспериментах, выполненных в поздние вечерние часы также при низком ($K_p \leq 1$) уровне геомагнитной активности [17]. Вместе с тем представленные в работе результаты демонстрируют не только уменьшение величины ПЭС во время нагрева ионосферной плазмы мощным коротковолновым радиоизлучением, как это наблюдалось в [17], но и его увеличение.

Ниже мы подробно рассмотрим наиболее характерные примеры из всего объёма полученных экспериментальных данных.

Начнём с сеанса № 13, проведённого 19.03.2009 с 11:31 до 14:41 UT (см. табл. 1). В этом сеансе мощная радиоволна отражалась на высоте примерно 200 км. Луч зрения на спутник пересекал возмущённую ионосферу на уровне отражения волны накачки с северо-востока (время входа в ограниченную контуром $0,1P_0$ область $T \approx 11:36$ UT) на запад (время выхода из этой области $T \approx 12:10$ UT); ближайшее расстояние от траектории на спутник до области магнитного зенита для волны накачки было порядка 25 км. Этот сеанс характеризуется слабой геомагнитной активностью с $K_p = 1^-$. Критическая частота f_{0F_2} была примерно 4,8 МГц. На ионограммах во время излучения мощной радиоволны регистрировалось появление слабой искусственной диффузности, что указывает на развитие умеренно интенсивных крупномасштабных неоднородностей с $l_{\perp} \geq 1$ км и $\Delta N/N$ не выше $(1 \div 3) \%$ [25].

На рис. 2а приведена полуторачасовая запись вариаций ПЭС с удалённым трендом для этого сеанса измерений. Здесь, как и на других рисунках, тонкими вертикальными линиями обозначен интервал времени нахождения спутника в пределах диаграммы направленности по уровню $0,1P_0$; на оси времени прямоугольниками выделены интервалы времени излучения мощной радиоволны в режиме (+10 мин, -5 мин), начиная с 11:31 UT. В этом эксперименте сеанс нагрева с 11:31 до 11:41 UT выполнялся, когда луч на спутник входил в область, ограниченную контуром $0,1P_0$ (примерно 8 МВт), практически в северной части возмущённой области (см. рис. 1).

Таблица 1

№	Дата и время сеанса	f_0 , $P_{эфф}$, режим излучения ВН	f_{0F_2} , $h_{отр}$, K_p	№ спутника, направление движения по ВО, время сближения с МЗВН	Наблюдаемые эффекты, величина вариаций ПЭС по основной гармонике модуляции мощности ВН, гармоники вариаций ПЭС	Комментарии
1	12 марта, 11:49– –13:55 UT	4,3 МГц, 80 МВт, (+3 мин; –3 мин)	5,1 МГц, 217 км, 1 [–]	GPS 32, с востока на северо- запад	Периодики с $\theta \approx 7 \div 8$ мин с вариациями $\pm 0,05$ TECU; есть периодики с $T \approx 3 \div 4$ мин.	Ранний вечер. Диффузность следов на ионограммах отсутствует.
2	12 марта, 11:49– –13:55 UT	4,3 МГц, 40 МВт, (+3 мин; –3 мин)	4,8 МГц, 205 км, 1 [–]	GPS 20, с северо-запада на юго-восток; около МЗ в 13:25 UT	Периодики с $\theta \approx 6$ мин с вариациями $\pm 0,05$ TECU; наиболее сильные вариации регистрировались юго- западнее МЗ; есть периодики с $\theta \approx 4 \div 6$ мин.	Ранний вечер. Слабая искус- ственная диффузность
3	13 марта, 06:31– –08:31 UT	4,3 МГц, 80 МВт, (+5 мин; –5 мин)	4,4 МГц, 212 км, 4	GPS 22, с юго-запада на северо-восток; точно в МЗ в 07:58 UT	Периодики с $\theta \approx 5 \div 9$ мин с вариациями от $-0,03$ до $+0,05$ TECU; наиболее сильные вариации регистрировались юго-западнее МЗ с 07:15 до 07:25 UT.	Предполуден- ные часы. Умеренная диффузность
4	13 марта, 12:51– –14:20 UT	4,3 МГц, 80 МВт, (+5 мин; –5 мин)	4,5 ÷ 4,1 МГц, 226 км, 3	GPS 20, около МЗ в 13:22 UT	Периодики с $\theta \approx 10$ мин с вариациями от $-0,03$ до $+0,05$ TECU; наиболее сильные вариации с $\theta \approx 10$ мин регистрировались в области МЗ; есть периодики с $T \approx 5 \div 7$ мин.	Ранний вечер. f_{0F_2} уменьшались от 4,5 до 4,1 МГц. Слабая диффузность.
5	15 марта, 07:16– –08:41 UT	4,3 МГц, 80 МВт, (+5 мин; –5 мин)	4,4 ÷ –4,2 МГц, 201 км, 3	GPS 22, с юго-запада на северо-восток; точно в МЗ в 07:51 UT	Периодики с $\theta \approx 10 \div 12$ мин с вариациями от $-0,08$ до $+0,05$ TECU; наиболее сильные вариации ПЭС регистрировались южнее МЗ.	Предполуден- ные часы. С 07:52 по 08:02 UT провал f_{0F_2} до 4,2 МГц. Многочувствительность без диффузности. $f_{0E_s} \leq 4$ МГц.

6	15 марта, 11:51– –13:56 UT	4,3 МГц, 80 МВт, (+5 мин; –5 мин)	4,8 МГц, 208 км, 2	GPS 32, с северо-востока на запад	Периодики с $\theta \approx 10 \div 13$ мин с вариациями $\pm 0,03$ TECU; наиболее сильные вариации регистрировались в северо-западной части ВО; есть периодики с $\theta \approx 5$ мин.	Послеполу- денные часы. Многолучёвость на ионограммах. Сла- бая диффузность.
7	15 марта, 11:51– –13:56 UT	4,3 МГц, 80 МВт, (+5 мин; –5 мин)	4,3 МГц, 214 км, 2	GPS 20, с северо-запада на юг; около МЗ в 13:15 UT	Периодики с $\theta \approx 10$ мин с вариациями от $-0,15$ до $+0,03$ TECU. регистрировались к югу от МЗ до контура $0,1P_0$ и даже несколько дальше.	Ранний вечер. f_{0F2} уменьшались 4,8 до 4,3 МГц. Слабая диффуз- ность. О-мода подавлена.
8	16 марта, 06:15– –08:26 UT	4,3 МГц, 40 МВт до 07:36 UT после — 80 МВт, (+30 с; –30 с) до 07:51 UT, после — (+5 мин; –5 мин)	4,8 МГц, 205 км, 1	GPS 22, с юго-востока на северо- запад; точно в МЗ в 07:47 UT	При 40 МВт вариации ПЭС не были зарегистрированы; при 80 МВт есть периодики с $\theta \approx 1$ мин с вариация- ми $\pm 0,01$ TECU и периодики с $\theta \approx 8 \div 10$ мин вариациями $\pm 0,02$ TECU; наиболее силь- ные 1-минутные и 10-минут- ные вариации ПЭС регистрировались около МЗ.	Предполуден- ные часы. Сильная диффузность.
9	17 марта, 06:31– –08:11 UT	4,3 МГц, 80 МВт, (+10 мин; –5 мин)	4,8 МГц, 193 км, 3	GPS 22, с юго-запада на северо-восток; точно в МЗ в 07:40 UT	Периодика с $\theta \approx 11 \div 14$ мин с ва- риациями от $-0,05$ до $+0,07$ TECU; наиболее сильные вариации ПЭС в 07:10–07:25 UT наблюдались несколько южнее МЗ; есть периодика с $\theta \approx 6$ мин.	Предполуден- ные часы. Многолучёвость на ионограммах.
10	18 марта, 06:31– –08:11 UT	4,3 МГц, 80 МВт, (+10 мин; –5 мин)	4,8 МГц, 191 км, 0 ⁺	GPS 22, с юго-запада на северо-восток; точно в МЗ в 07:39 UT	Периодика с $\theta \approx 12 \div 18$ мин с ва- риациями от $-0,1$ до $+0,03$ TECU; наиболее сильные вариации ПЭС регистрировались несколько несколько южнее МЗ; есть периодика с $\theta \approx 7$ мин.	Предполуден- ные часы. Умеренная диффузность.

11	18 марта, 12:31– –15:11 UT	4,3 МГц, 80 МВт, (+10 мин; –5 мин)	4,8 МГц, 203 км, 0 ⁺	GPS 20, с северо-запада на юго- юго-восток; около МЗ в 13:02 UT	Периодики с $\theta \approx 12 \div 17$ мин с вариациями от $-0,05$ до $+0,03$ TECU; наиболее сильные 15-минутные вариации регистрировались около МЗ и немного южнее МЗ; есть периодики с $\theta \approx 8$ мин.	Ранний вечер. Диффузность следов на ионограммах отсутствует.
12	19 марта, 06:31– –08:11 UT	4,3 МГц, 80 МВт, (+10 мин; –5 мин)	4,8 МГц, 195 км, 1 ⁻	GPS 22, с юго-запада на северо-восток; точно в МЗ в 07:34 UT	Периодики с $\theta \approx 12 \div 14$ мин с вариациями $\pm 0,05$ TECU; наиболее сильные вариации ПЭС регистрировались к юго-западу от МЗ; есть периодики с $\theta \approx 5 \div 8$ мин.	Послеполуденные часы. Слабая диффузность.
13	19 марта, 11:31– –14:41 UT	4,3 МГц, 80 МВт, (+10 мин; –5 мин)	4,8 МГц, 196 км 1 ⁻	GPS 32, с северо-востока на запад	Периодики с $\theta \approx 12 \div 17$ мин с вариациями $\pm 0,05$ TECU.	Послеполуденные часы. Слабая диффузность.
14	19 марта, 11:31– –14:41 UT	4,3 МГц, 80 МВт, (+10 мин; –5 мин)	4,8 МГц, 200 км, 1 ⁻	GPS 20, с северо-запада на юго-юго-восток; около МЗ в 12:57 UT	Периодики с $\theta \approx 15$ мин с вариациями от $-0,05$ до $+0,02$ TECU; их интенсивность увеличивается с приближением к МЗ; есть периодики с $\theta \approx 7$ мин и $\theta \approx 4$ мин.	Ранний вечер. Умеренная диффузность.

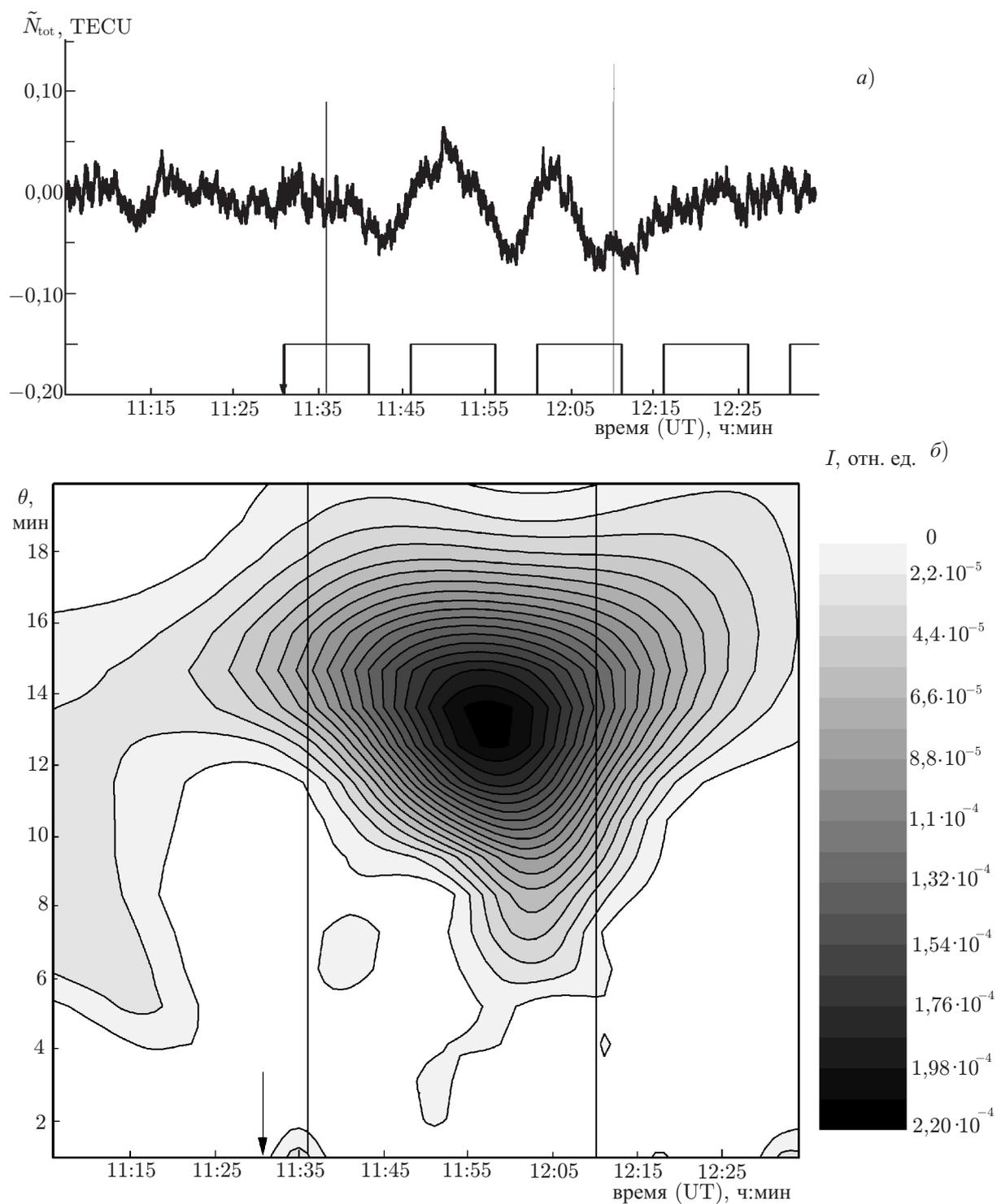


Рис. 2. Вариации ПЭС (а) и их вейвлет-спектр (б) для сеанса № 13, 19.03.2009. Вертикальная стрелка соответствует началу нагрева, яркостная шкала соответствует интенсивности вариаций

Сеанс нагрева с 11:46 до 11:56 UT выполнялся, когда луч на спутник проходил наиболее близко (приблизительно в 25 км) от центра диаграммы направленности антенны стенда, что соответствует уровню $0,2P_0$. Наконец, сеанс нагрева с 11:31 до 11:41 UT выполнялся, когда луч зрения

на спутник подходил к контуру $0,1P_0$ в западной части возмущённой области. На рис. 2б для этого сеанса измерений представлен вейвлет-спектр вариаций ПЭС, откуда хорошо видно, что с момента $T \approx 11:25$ UT и до момента $T \approx 12:20$ UT в записи вариаций ПЭС отчётливо выделяются периодики с периодом $\theta \approx 12 \div 16$ мин (с максимальной их интенсивностью для $\theta \approx 13 \div 14$ мин на интервале времени 11:45–12:10 UT или практически вдоль всей траектории луча на спутник внутри возмущённой области по уровню $0,1P_0$), которые являются следствием 15-минутной периодичности включения волны накачки. Для этого цикла измерений регистрировались вариации ПЭС в пределах от $+0,05$ до $-0,07$ TECU относительно своего невозмущённого уровня. Заметим, что временной масштаб основной периодики здесь несколько отличается от периода излучения волны накачки, что (см. ниже) определяется изменением временных характеристик развития и релаксации индуцированных нагревом возмущений ПЭС в пределах возмущённой области ионосферы.

Из представленных на рис. 2 данных нетрудно видеть, что в северо-восточной части возмущённой области включение нагрева ионосферы приводит, главным образом, к уменьшению величины ПЭС (и концентрации плазмы соответственно). Вариации ПЭС начинают обнаруживаться с входом луча внутрь контура $0,1P_0$ и продолжают регистрироваться еще на протяжении примерно 10 мин после выхода луча из него в западной части возмущённой области; к западу смещён и центр наиболее интенсивных периодик. Эти измерения позволяют оценить мощность волны накачки, при которой начинают регистрироваться вариации концентрации плазмы, превышающие $0,01$ TECU: $P_{\text{пор}}^* \approx 4$ МВт на северном крае возмущённой области и $P_{\text{пор}}^* \approx 2$ МВт на её западном крае (здесь и ниже значения P^* приводятся с учётом поглощения радиоволн в нижних слоях ионосферы). Следует также отметить, что на краю диаграммы требуется прогрев плазмы в течение более 5 мин, чтобы было зарегистрировано индуцированное нагревом уменьшение ПЭС, по сравнению с более короткими временами в области, расположенной ближе к центральной части возмущённой области. Такая зависимость времени развития изменений ПЭС по возмущённой области приводит, в частности, к тому, что масштаб наиболее интенсивных периодик может отличаться от периода излучения мощной радиоволны как в большую, так и меньшую стороны. С другой стороны, заметное отличие масштаба периодик от периода излучения волны накачки может рассматриваться как признак наличия сильных вариаций временных характеристик эволюции ПЭС по возмущённой области ионосферы.

Если уменьшение величины ПЭС связывать с образованием полости пониженной концентрации плазмы вблизи высоты отражения волны накачки, то в предположении, что релаксация полости определяется продольной амбиполярной диффузией плазмы, можно оценить её продольный (вдоль геомагнитного поля) размер как $L_{\parallel} \approx 10 \div 15$ км по времени восстановления уровня ПЭС после выключения нагрева ионосферы, составляющему порядка 5 мин. Размер этой полости вдоль траектории луча (приблизительно поперёк геомагнитного поля) составляет $40 \div 50$ км. Тогда по величине уменьшения ПЭС на $0,07$ TECU можно дать оценку относительной величины уменьшения плотности плазмы в этой полости как $\Delta N/N \approx -20$ %. Мы получаем очень большое значение $\Delta N/N$, особенно если учесть, что представленные здесь измерения проводились в дневных условиях фактически на краю диаграммы направленности, где уровень мощности излучения волны накачки составлял $P_{\text{эфф}}^* \approx 4$ МВт. Такое уменьшение плотности плазмы не подтверждается ни результатами радиотомографических измерений [13, 16], ни данными каких-либо других ионосферных исследований. Оно оказывается близким к результатам экспериментов [17], которые выполнялись в поздние вечерние и ночные часы в несравненно более благоприятных для эффективного нагрева ионосферы условиях.

Завершая анализ полученных в этом сеансе измерений данных, отметим, что для сеанса нагрева с 11:46 до 11:56 UT, когда спутник находился наиболее близко к области магнитного зенита

для волны накачки, сначала наблюдается увеличение ПЭС на величину порядка 0,05 ТЕСУ, и только спустя примерно 3 мин наступает фаза его уменьшения. Ниже при представлении других экспериментальных данных мы вернёмся к анализу такого характера изменения ПЭС.

Рассмотрим теперь результаты, полученные в сеансе № 5, который был проведён 15.03.2009 с 07:16 до 08:41 UT. В этом сеансе мощная радиоволна излучалась в режиме (+5 мин; –5 мин), начиная с 07:16 UT. Высота её отражения в ионосфере была 200 км. Луч зрения на спутник пересекал возмущённую область ионосферы с юго-запада (время входа в возмущённую область, ограниченную контуром $0,1P_0$, $T \approx 07:31$ UT) на северо-восток (время выхода из этой области примерно 08:11 UT), проходя через область магнитного зенита для волны накачки приблизительно в 07:51 UT. Этот сеанс характеризуется умеренной геомагнитной активностью с $K_p = 3$. Критическая частота f_{0F_2} была примерно 4,4 МГц в начале сеанса, 4,2 МГц (или немного ниже частоты волны накачки $f_0 = 4,3$ МГц) в интервале времени 07:50–08:12 UT, когда луч на спутник смещался по возмущённой области от магнитного зенита для волны накачки к её северо-восточному краю; с 08:12 UT и до конца сеанса значения f_{0F_2} вновь повысились и составляли примерно 4,6 МГц. Во время всего этого сеанса измерений существовал достаточно мощный спорадический E -слой с критической частотой f_{0E_s} до $3,5 \div 4,0$ МГц. Также ионограммы характеризовались наличием дополнительных следов на концах ветвей, отвечающих O - и X -модам распространения в F_2 -области ионосферы, что является проявлением многолучёвости при распространении зондирующих радиоволн за счёт, например, появления дополнительных трасс при их отражении от спорадического слоя E . Отметим, что искусственная диффузность на ионограммах здесь не обнаруживалась.

На рис. 3 приведены полуторачасовая запись вариации ПЭС для этого сеанса измерений и их вейвлет-спектр, из которого видно, что начиная с 07:20 UT и до 07:55 UT в записи ПЭС обнаруживаются периодики с $\theta \approx 8 \div 15$ мин, которые могут быть отнесены к 10-минутной периодичности включения волны накачки. Также на интервале времени 07:31–07:46 UT отчётливо выделяется область интенсивных вариаций ПЭС в пределах от +0,05 до –0,1 ТЕСУ для периодик с $\theta \approx 9 \div 13$ мин с наибольшей интенсивностью периодики для $\theta \approx 11$ мин на участке траектории приблизительно от контура $0,1P_0$ до области магнитного зенита для волны накачки. Важно отметить, что наличие вызванных нагревом ионосферы периодик здесь стало регистрироваться с 07:20 UT, когда точка пересечения луча зрения на спутник с возмущённой областью находилась ещё за контуром $0,1P_0$, т. е. в области, где $P_{\text{эф}}^* \leq 1$ МВт (без учёта влияния дефокусирующей линзы, рассматриваемого ниже). Особенностью этого сеанса явился провал критической частоты f_{0F_2} ниже частоты волны накачки на интервале времени 07:50–08:12 UT, и, начиная с 07:52 UT, в принимаемом сигнале перестали обнаруживаться индуцированные нагревом вариации ПЭС, что является прямым свидетельством их искусственного характера. Хотя после 08:12 UT значения f_{0F_2} возросли до 4,6 МГц, луч на спутник уже вышел за границу контура $0,1P_0$ в её северо-восточной части, и вариации ПЭС здесь больше не появились. Исходя из этого, мы можем получить для северо-восточной части возмущённой области оценку пороговой мощности генерации вариаций ПЭС как $P_{\text{пор}}^* \geq 4$ МВт, что совпадает с ранее полученным её значением.

Как видно из представленной на рис. 3а осциллограммы, после включения волны накачки величина ПЭС сначала может увеличиваться в течение $1 \div 3$ мин до уровня, превышающего её невозмущённое значение на величину до 0,05 ТЕСУ, после чего регистрируется достаточно резкое уменьшение величины ПЭС. Здесь большие времена соответствуют большому смещению зондируемой области к периферии возмущённой области. Существенно, что уменьшение величины ПЭС продолжается ещё $1 \div 3$ мин после выключения волны накачки. Поскольку остывание электронов в F_2 -области происходит за несколько секунд, после чего начинают релаксировать и индуцированные нагревом возмущения концентрации плазмы, такие большие времена могут

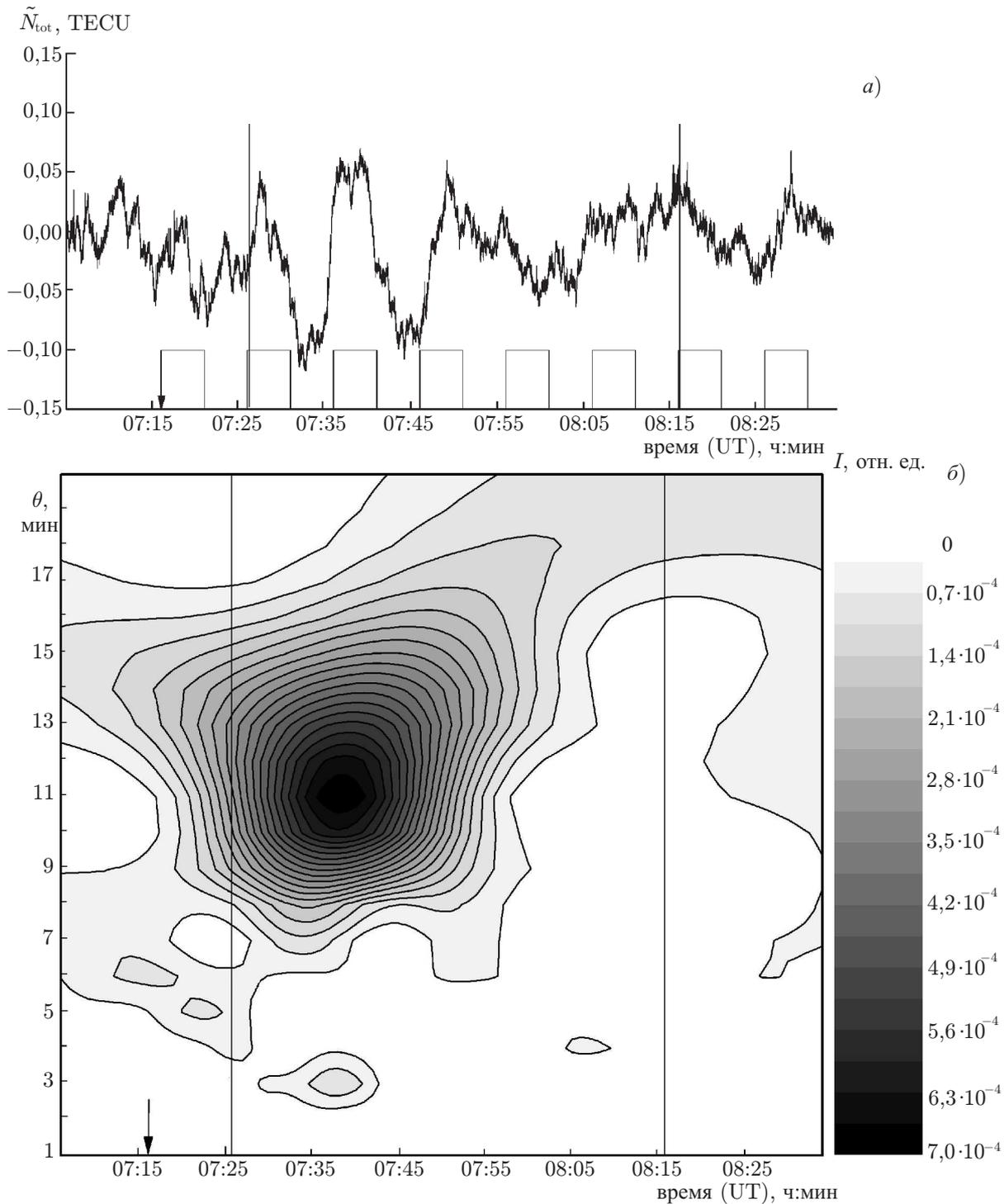


Рис. 3. Вариации ПЭС (а) и их вейвлет-спектр (б) для сеанса № 5, 15.03.2009. Вертикальная стрелка соответствует началу нагрева, яркостная шкала соответствует интенсивности вариаций

рассматриваться как свидетельство того, что наблюдаемое здесь изменение плотности плазмы происходит не в центральной части возмущённой области около высоты отражения волны накачки, а на достаточно больших расстояниях от неё. Таким образом, это изменение является, по существу, вторичной турбулентностью, индуцированной в плазме распространяющимися вдоль

линий геомагнитного поля первичными плазменными возмущениями. Возбуждение вторичной плазменной турбулентности далеко от центральной части возмущённой области регистрировалось в экспериментах [26–28]. После окончания стадии уменьшения величины ПЭС начинается её восстановление к невозмущённому уровню, темп которого увеличивается после включения волны накачки за счёт индуцированных нагревом процессов в возмущённой мощной радиоволновой ионосфере. Исключение составляет цикл нагрева 07:36–07:46 UT, когда луч зрения на спутник пересекал возмущённую область практически в области магнитного зенита для волны накачки, в котором максимальный уровень ПЭС около +0,06 TECU сохранялся до конца четвёртой минуты нагрева, после чего наблюдалось резкое его уменьшение до –0,06 TECU.

Рассмотренный выше характер вариаций ПЭС естественно связать с конкуренцией двух процессов, более быстрый из которых, вызывающий рост ПЭС, превалирует сразу после включения волны накачки и наблюдается преимущественно в южной части возмущённой области (точнее, между магнитным зенитом для волны накачки и магнитным зенитом), а более медленный приводит к его уменьшению, спустя нескольких минут после начала нагрева плазмы. Принимая во внимание результаты анализа данных сеанса № 13, следует констатировать, что первый процесс является мало существенным в северо-восточной части возмущённой области. Изменение временных характеристик этих процессов по возмущённой области ионосферы и их взаимовлияние приводят к тому, что в экспериментах наблюдаются сложные формы вариаций ПЭС и отличие масштабов наиболее интенсивных периодов от периода нагрева ионосферной плазмы.

Важные с точки зрения понимания физики наблюдаемых процессов результаты были получены в эксперименте, который был выполнен 16.03.2009 с 07:05 до 07:51 UT в условиях очень низкой геомагнитной возмущённости с $K_p \approx 1$ (см. сеанс № 8 в табл. 1). В этом сеансе луч на спутник пересекал область магнитного зенита для волны накачки в 07:47 UT. Мощная радиоволна отражалась на высоте примерно 205 км. В первой половине сеанса она излучалась в режиме (+30 с; –30 с) с эффективной мощностью 40 МВт до 07:36 UT и с $P_{эфф} = 80$ МВт позднее. Режим излучения волны накачки (+30 с; –30 с) обычно рассматривается как нагрев ионосферной плазмы в условиях её сильной остаточной возмущённости (в условиях сильного последствия) [9]. Отмечается, что воздействие с $P_{эфф} = 80$ МВт приводило к развитию достаточно интенсивного спорадического F -слоя (F_{spread}) на ионограммах. Во второй половине сеанса с 07:51 UT стэнд был переведён в режим излучения (+5 мин; –5 мин) с $P_{эфф} = 80$ МВт.

На рис. 4а приведён фрагмент записи вариаций ПЭС на интервале 07:35–07:50 UT, на рис. 4б — вейвлет-спектр вариаций ПЭС для всего сеанса. Из спектрограммы (рис. 4б) хорошо видно, что вариации ПЭС с $\theta \approx 1$ мин начинают регистрироваться только начиная с 07:36 UT, сразу после того, как мощность волны накачки была увеличена с 40 до 80 МВт, и исчезают в 07:51 UT с окончанием этого режима излучения, ясно указывая на их искусственный характер. Они имеют максимальную амплитуду вблизи 07:40 UT, когда луч зрения на спутник пересекал возмущённую ионосферу приблизительно в 10 км юго-западнее области магнитного зенита для волны накачки. Из представленных на рис. 4а данных следует, что: 1) включение нагрева на 30 с приводит к увеличению ПЭС на примерно 0,03 TECU за время порядка $5 \div 10$ с, где большие времена отвечают большим расстояниям от магнитного зенита, причём такое увеличение наступает с задержкой $10 \div 20$ с относительно включения волны накачки; 2) время восстановления ПЭС после выключения волны накачки можно оценить как $20 \div 30$ с, причём релаксация также наступает с задержкой, которая составляет порядка 5 с. Результаты этого эксперимента показывают, что такие быстрые короткопериодические вариации ПЭС развиваются только при достаточно больших мощностях волны накачки $P_{эфф} > 40$ МВт.

Следующий эксперимент, результаты которого мы представляем в настоящей работе, был проведён 18 марта с 06:31 до 08:11 UT (см. сеанс № 10 в табл. 1). В выполненных здесь из-

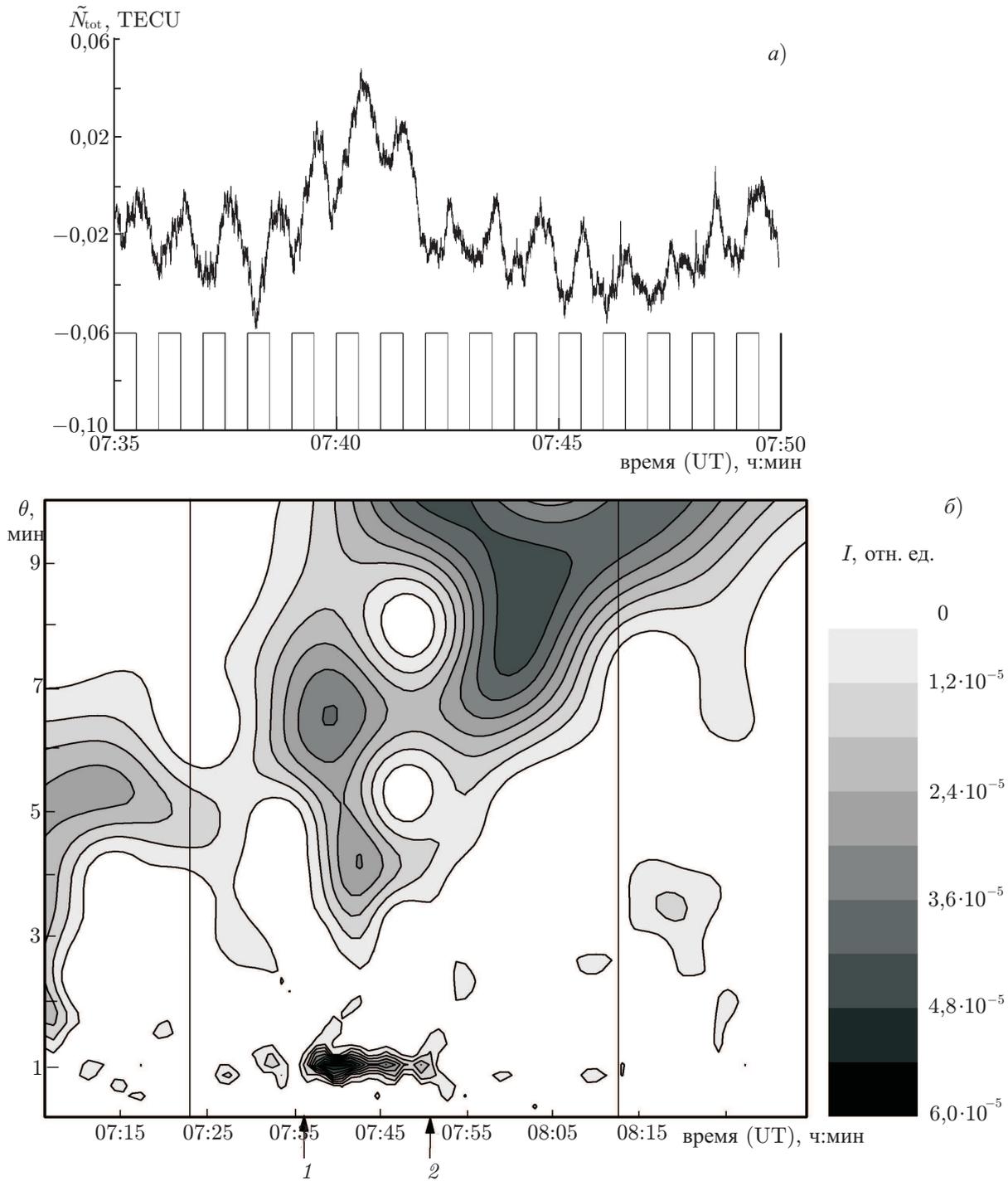


Рис. 4. Вариации ПЭС (а) и их вейвлет-спектр (б) для сеанса № 8, 16.03.2009. Яркостная шкала соответствует интенсивности вариаций. Стрелкой 1 обозначен переход с $P_{эфф} = 40$ МВт на $P_{эфф} = 80$ МВт, стрелкой 2 — переход с режима (+30 с; -30 с) на режим (+5 мин; -5 мин)

мерениях луч зрения на спутник пересекал возмущённую область ионосферы по траектории с юго-запада (время входа в область, ограниченную контуром $0,1P_0$, 07:15 UT) на северо-восток (время выхода из этой области 08:05 UT), проходя через область магнитного зенита для волны накачки около 07:39 UT. Мощная радиоволна излучалась с 06:31 до 08:11 UT в режиме (+10 мин;

–5 мин). Этот сеанс выполнялся в очень спокойных геомагнитных условиях ($K_p = 0^+$); критические частоты f_{0F_2} были порядка 5,1 МГц в начале сеанса, 4,8 МГц в середине сеанса, когда луч на спутник находился вблизи области магнитного зенита для волны накачки, и 5,3 МГц в конце сеанса. Волна накачки отражалась на высоте примерно 190 км. На ионограммах отмечалось появление умеренной диффузности во время нагрева ионосферы.

На рис. 5а показаны вариации ПЭС с удалённым трендом на интервале времени 06:55–08:25 UT, на рис. 5б — их вейвлет-спектр. На рис. 5б отчётливо видно наличие выраженной периодики с $\theta \approx 15$ мин на интервале времени 06:55–07:40 UT с наиболее интенсивным сигналом с 07:10 до 07:30 UT — в области на $15 \div 50$ км юго-западнее магнитного зенита для волны накачки. Важно отметить, что видимые вариации ПЭС здесь начали регистрироваться ещё за 35 км до контура $0,1P_0$. Из осциллограммы вариаций ПЭС, представленной на рис. 5а, можно заключить, что вне области магнитного зенита для волны накачки (в циклах, начинающихся в 07:01; 07:16 и 08:01 UT) в первые 6 мин после начала нагрева имеет место продолжение увеличения величины ПЭС приблизительно до уровня $0,03 \div 0,05$ TECU, и только позднее начинает наблюдаться её уменьшение. Это уменьшение продолжается ещё $1 \div 2$ мин после окончания нагрева ионосферы (более длинные времена на больших расстояниях от магнитного зенита для волны накачки), достигая в итоге значений до $-0,07$ TECU относительно своего невозмущённого уровня. Далее наблюдается переход к стадии восстановления с увеличением величины ПЭС. В отличие от этих циклов, непосредственно в области магнитного зенита для волны накачки (цикл с началом нагрева в 07:31 UT) регистрируется очень быстрый рост величины ПЭС практически до своего невозмущённого уровня, а в конце цикла нагрева в течение примерно 3 мин можно видеть ещё и появление локального максимума ПЭС с превышением среднего уровня до $0,03$ TECU. В следующем цикле нагрева с началом в 07:46 UT, когда луч на спутник пересекал возмущённую область примерно в 25 км к северо-востоку от области магнитного зенита для волны накачки, значимых вариаций ПЭС не обнаруживается. Однако они опять присутствуют в цикле с началом в 08:01 UT, когда луч на спутник пересекал северо-восточный край возмущённой области по уровню $0,1P_0$. Здесь после включения волны накачки видно сначала быстрое увеличение ПЭС до $+0,05$ TECU и только спустя примерно 7 мин наблюдается его уменьшение. Отмеченное здесь изменение характера поведения ПЭС вдоль траектории спутника, которая пересекает возмущённую область с юго-запада на северо-восток и проходит через область магнитного зенита для волны накачки, наблюдалось и в других измерениях.

В завершение рассмотрения полученных результатов отметим ещё одну важную особенность поведения ПЭС, на которую было обращено внимание в [24]. Она касается генерации возмущений плотности плазмы с частотой, кратной частоте модуляции мощной радиоволны. На рис. 6 представлены осциллограмма вариаций ПЭС и их вейвлет-спектр, которые демонстрируют такую ситуацию. Представленные на рис. 6 данные были получены 15 марта (сеанс № 6) во время сеанса измерений с 11:51 до 13:56 UT. Мощная волна излучалась в режиме (+5 мин; –5 мин) с мощностью $P_{эфф} = 80$ МВт. В этом сеансе луч на спутник пересекал возмущённую область с северо-запада на восток, проходя примерно в 12:20 UT в 25 км северо-восточнее магнитного зенита для волны накачки. На вейвлет-спектре видно появление периодики с $\theta \approx 12$ мин на интервале времени 12:05–12:15 UT. До этого на интервале 11:30–12:05 UT обнаруживается появление периодики с $\theta \approx 5 \div 6$ мин, позднее на интервале 12:20–12:35 UT регистрируется периодика с $\theta \approx 3 \div 4$ мин и ещё немного позднее — периодика с $\theta \approx 2$ мин. С 12:25–12:45 UT видно появление периодики с $\theta \approx 7 \div 9$ мин. Обсуждение возможного механизма появления гармоник основной периодики приведено в [24], где нечётные гармоники (в нашем случае с $\theta \approx 3$ мин и $\theta \approx 2$ мин) связываются со спектром излучения мощной радиоволны при её амплитудной модуляции типа меандр. Однако в спектре симметричного меандра ((+5 мин; –5 мин) в нашем случае) нет вто-

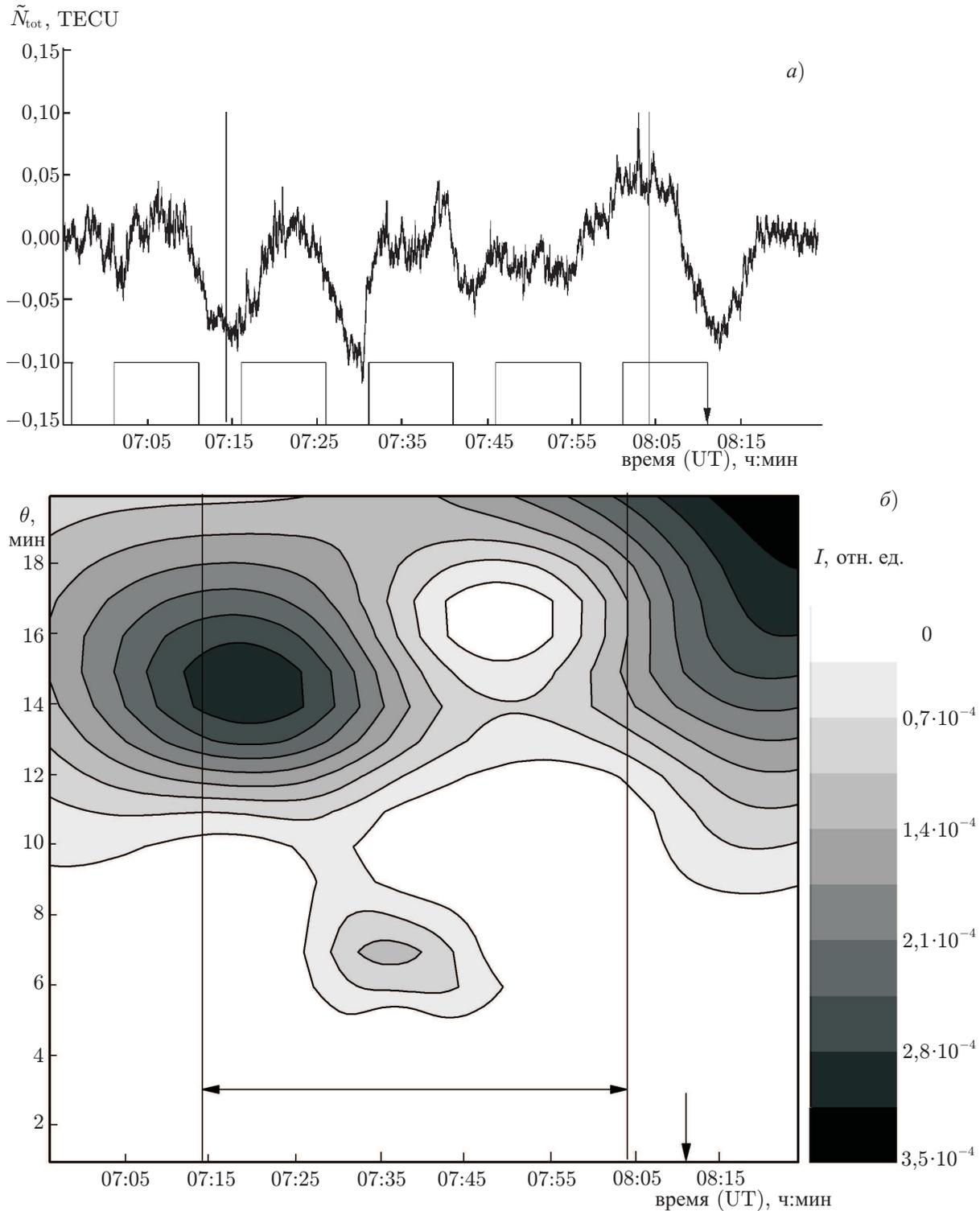


Рис. 5. Вариации ПЭС (а) и их вейвлет-спектр (б) для сеанса № 10, 18.03.2009. Вертикальная стрелка соответствует окончанию нагрева, яркостная шкала соответствует интенсивности вариаций

рой гармоники с $\theta \approx 5$ мин, которая регистрируется в спектре принимаемого сигнала. Есть все основания полагать, что она рождается в ионосфере. Полученные экспериментальные данные

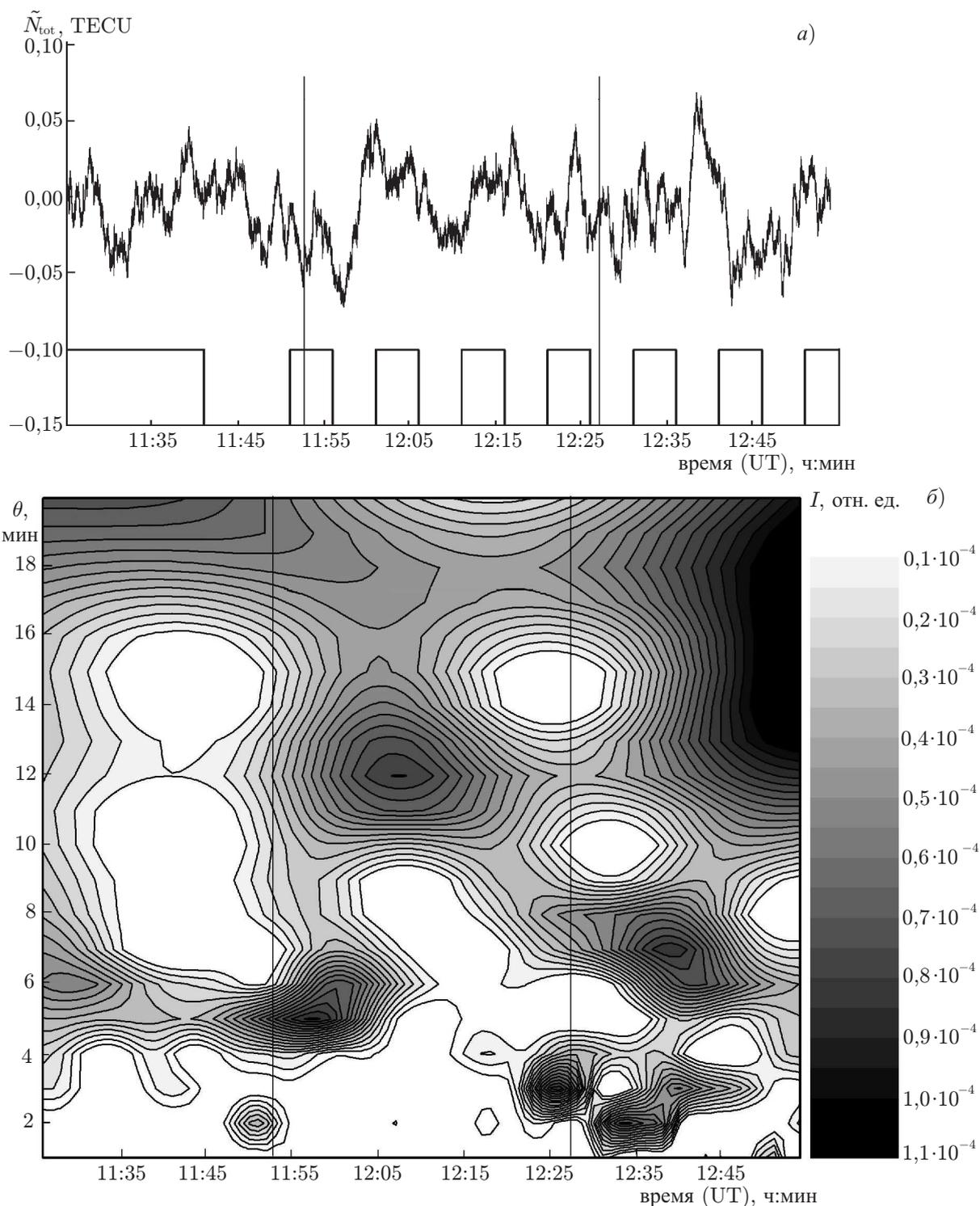


Рис. 6. Вариации ПЭС (а) и их вейвлет-спектр (б) для сеанса № 6, яркостная шкала соответствует интенсивности вариаций

позволяют заключить, что вторая гармоника основной периодики часто появляется в области магнитного зенита для волны накачки либо несколько южнее него, она регистрируется более короткое время, чем основная периодика, и не обязательно в то время, когда та имеет максимальную

интенсивность. Периодики, для которых временные масштабы приблизительно в 2 раза короче, чем период нагрева ионосферы, можно видеть также на рис. 2б и 5б. Однако в этих случаях нагрев ионосферы осуществлялся в режиме (+10 мин; –5 мин), и вторая гармоника частоты модуляции присутствует в спектре излучаемого сигнала волны накачки. Тем не менее, регистрация второй гармоники только южнее области магнитного зенита для волны накачки и, как правило, вне области максимальной амплитуды периодики основной частоты может служить фактом, косвенно свидетельствующим о том, что определённая её часть также может генерироваться в возмущённой области ионосферы.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Проведённые в условиях освещённой Солнцем ионосферы измерения вариаций ПЭС по сигналам навигационных спутников системы GPS показывают, что внутри возмущённой области, ограниченной контуром $0,1P_0$ по диаграмме направленности, практически во всех выполненных сеансах детектировались периодики, близкие к периоду нагрева ионосферы мощным коротковолновым излучением стенда «Сура». На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы относительно основных свойств наблюдаемых вариаций ПЭС.

1) Во время нагрева ионосферной плазмы регистрировались изменения величины ПЭС в сторону как увеличения, так и уменьшения его значений относительно невозмущённого уровня. При этом в центральной и южной частях возмущённой области часто в начале нагрева в течение нескольких минут наблюдается увеличение ПЭС и только после этого наступает стадия его уменьшения; в северной и северо-восточной частях возмущённой области, как правило, регистрируется уменьшение величины ПЭС. Важно, что разным типам вариаций ПЭС соответствуют разные характерные времена развития и релаксации и степень проявления в разных частях возмущённой области ионосферы. Полученные экспериментальные данные позволяют предполагать существование нескольких процессов, параллельно развивающихся в возмущённой области ионосферы, которые по-разному влияют на регистрируемые вариации ПЭС, определяя тем самым наблюдаемые сложные формы его поведения.

2) Мощности, при которых появлялось уменьшение величины ПЭС, составляют примерно 4 МВт на северном и восточном краях возмущённой области, 2 МВт на её западном крае и менее 1 МВт на южном крае, демонстрируя выраженную тенденцию уменьшения $P_{\text{пор}}^*$ с приближением к области магнитного зенита для местоположения стенда «Сура». Эти значения близки к порогам развития параметрических неустойчивостей при взаимодействии мощной электромагнитной волны О-поляризации с магнитоактивной плазмой [9]. Увеличение величины ПЭС регистрировалось в основном к югу от магнитного зенита для волны накачки вплоть до магнитного зенита. Оно резко усиливалось при уровне мощности волны накачки $P_{\text{эфф}}^* \geq 5 \div 10$ МВт, хотя за южным краем возмущённой области по уровню $0,1P_0$ слабые вариации ПЭС наблюдались и при меньших мощностях. Особо следует отметить, что пороговые мощности появления быстрых вариаций ПЭС при короткопериодическом нагреве в режиме (+30 с; –30 с) составляли $P_{\text{пор}}^* \approx 20$ МВт.

3) Характерные времена индуцированного нагревом уменьшения ПЭС зависят от режима излучения волны накачки, составляя несколько минут в режиме «холодного старта» после достаточно длительной (более 5 мин) паузы её излучения, показывая меньшие значения с приближением к центру диаграммы направленности. Для случаев увеличения ПЭС времена их развития составляли менее 1 мин. При короткопериодическом нагреве в режиме (+30 с; –30 с) были зарегистрированы наиболее быстрые вариации ПЭС с характерными временами его роста и восстановления порядка 10 с и 20 с соответственно. При этом имеет место задержка начала роста

ПЭС на $10 \div 20$ с и задержка его восстановления примерно на 5 с.

4) По данным измерений вариаций ПЭС по траектории спутника, проходящей через возмущённую область с юго-запада на северо-восток через область магнитного зенита для волны накачки генерация наиболее сильных его вариаций наблюдалась в пределах от магнитного зенита для волны накачки, куда была ориентирована диаграмма направленности антенны стенда, до южного края возмущённой области по уровню $0,1P_0$ (фактически до области магнитного зенита), для которого в утренние и вечерние часы наблюдений уровень эффективной мощности волны накачки составлял $P_{эфф}^* \approx 4$ МВт. Однако здесь важно подчеркнуть, что более слабые, но ещё хорошо обнаруживаемые вариации ПЭС регистрировались и на $20 \div 40$ км южнее контура $0,1P_0$, где эффективная мощность излучения с учётом диаграммы направленности не превышает 1 МВт. Такая ярко выраженная асимметрия области с индуцированными нагревом вариациями ПЭС относительно центра диаграммы направленности (или относительно магнитного зенита для волны накачки) является типичной для выбранной траектории луча зрения на спутник по возмущённой области ионосферы.

5) Наибольшие вариации ПЭС относительно его невозмущённого уровня в большинстве случаев находились в интервале $\pm(0,03 \div 0,05)$ TECU; их экстремальные значения достигали величин $+0,05$ и $-0,1$ TECU. Если считать, следуя [23], что на высотах порядка 200 км размер области с дефицитом плотности плазмы вдоль геомагнитного поля составляет $L_{\parallel} \approx 10 \div 15$ км, можно получить оценку вариаций плотности плазмы $\Delta N/N \approx -20\%$ в условиях модификации утренней и вечерней ионосферы при $P_{эфф}^* \approx 40$ МВт. Как уже отмечалось выше, получаются слишком большие значения уменьшения плотности плазмы, которые лишь немного уступают их величине в поздние вечерние и ночные часы наблюдений [17] и не подтверждаются радиотомографическими измерениями (см., например, [13, 16]), а также какими-либо другими известными экспериментальными данными. В рассматриваемых здесь измерениях, за исключением сеанса № 8, F_{spread} на ионограммах вертикального зондирования либо не регистрировался вовсе, либо был достаточно слабо развит, что говорит о невысокой ($\Delta N/N \leq (1 \div 3)\%$) интенсивности возбуждаемых нагревом крупномасштабных искусственных неоднородностей плотности плазмы с $l_{\perp} \geq 1$ км.

6) Довольно часто, кроме основной периодики, соответствующей периоду излучения импульсов волны накачки, в вейвлет-спектре принимаемого сигнала регистрировались не только третья и пятая гармоники, которые могут быть отнесены к гармоникам спектра излучения мощной волны в режиме симметричного меандра, но ещё и интенсивная вторая гармоника основной периодики. Её важным свойством является то, что в большинстве случаев она имеет максимальную интенсивность не в тех областях, где наиболее выражена основная периодика, хотя обе они наиболее часто обнаруживаются в области между магнитным зенитом для волны накачки и собственно магнитным зенитом.

Для интерпретации полученных экспериментальных данных необходимо, в первую очередь, объяснить следующие ключевые свойства устойчиво наблюдаемых явлений.

1) Появление положительных и отрицательных приращений величины ПЭС. Согласно [12, 23], при модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением сначала происходит быстрый разогрев электронов (наиболее сильный вблизи высоты отражения мощной радиоволны О-поляризации в области её резонансного взаимодействия с плазмой), а затем (в силу различных причин) более медленное изменение её концентрации. При этом на высотах $130 \div 180$ км увеличение температуры электронов приводит к ослаблению рекомбинационных процессов и росту электронной концентрации, а следовательно, и к росту ПЭС. Этим объясняется образование на этих высотах дефокусирующей линзы при нагреве дневной ионосферы [22] (в ночных условиях такая линза не образуется из-за малой концентрации плазмы на этих высотах). Согласно [22], при мощностях волны накачки $100 \div 150$ МВт дефокусирующая линза формируется за $5 \div 30$ с и

релаксирует за несколько десятков секунд. Она характеризуется увеличением плотности плазмы $\Delta N/N$ до $10 \div 20$ % и имеет фокусное расстояние порядка 70 км. Поскольку с уменьшением мощности излучаемой волны накачки эффективность образования такой линзы резко уменьшается, то она развивается только в пределах главного лепестка диаграммы направленности при $P_{эфф} \geq 50$ МВт. Это, в частности, объясняет отсутствие её влияния в областях севернее области магнитного зенита для волны накачки на 25 км и более. Последнее подтверждается результатами измерений рассмотренного нами в данной работе сеанса № 13.

Считая, что вертикальные размеры дефокусирующей линзы составляют $30 \div 50$ км, по величине увеличения в ней ПЭС примерно на $0,05$ TECU нетрудно получить оценку увеличения плотности плазмы: $\Delta N/N \approx 4 \div 7$ %, которая полностью соответствует полученным в [22] результатам для наших мощностей $P_{эфф} \approx 80$ МВт. Формирование такой линзы объясняет достаточно быстрый рост ПЭС после включения волны накачки и его уменьшение после её выключения. Важным следствием появления дефокусирующей линзы является расширение пучка мощных радиоволн и уменьшение в несколько раз плотности потока электромагнитной энергии на уровне их отражения. Последнее приводит к уменьшению эффективности взаимодействия волны накачки с плазмой, а следовательно, и к уменьшению интенсивности генерируемой здесь искусственной ионосферной турбулентности и увеличению характерных времён её развития, что характерно для дневных условий модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением.

Временные характеристики вариаций ПЭС в режиме излучения волны накачки ($+30$ с; -30 с) (см. рис. 4а, сеанс № 8) хорошо соответствуют временам развития и релаксации такой линзы. Также этим объясняются требуемые высокие мощности излучения для появления наблюдаемой модуляции ПЭС. Наблюдаемые времена задержки начала роста ПЭС после включения волны накачки и его уменьшения после её выключения вполне могут быть объяснены временами разогрева и остывания электронов в ионосферной плазме. Планируемые новые измерения должны дать более полную информацию о существовании явлений, наблюдаемых при таких короткопериодических воздействиях.

На высотах $h > 200$ км начинают преобладать процессы термодиффузионного переноса, причём их доминирование увеличивается с высотой [23]. При этом в верхней части F_2 -области с ростом температуры электронов их концентрация уменьшается, что и наблюдалось в [13, 16, 17].

Особую роль играют высоты $h \approx 200$ км, на которых и происходило отражение мощной радиоволны для рассматриваемых в работе экспериментов. Здесь, согласно [23], возмущения концентрации плотности плазмы при её нагреве мощной радиоволной должны быть незначительными. Это подтверждается отсутствием сильных возмущений плотности плазмы при нагреве дневной ионосферы, наблюдаемым в различных экспериментах, включая ионозондовые измерения, зондирование возмущённой области сигналами спутника, радиотомографические исследования и др. [1, 9, 13, 16]. Если всё же допускать, что полученная величина уменьшения ПЭС до $0,1$ TECU определяется только изменением плотности плазмы в области отражения волны накачки, то это давало бы величину $\Delta N/N \approx -20$ %, которую следует признать заведомо завышенной на порядок или даже больше. Здесь следует отметить, что в работах [18, 19] полученные по измерениям ПЭС величины вариаций плотности плазмы, вызванные нагревом ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением, также признавались авторами необъяснимо большим. Для допустимых величин $\Delta N/N \approx -1$ % продольные (вдоль луча зрения на спутник) размеры области с пониженной плотностью плазмы для измеренных значений уменьшения ПЭС должны были бы быть порядка 300 км, т. е. такая область должна заведомо захватывать и высоты внешней ионосферы. Следует заметить, что включение в рассмотрение таких больших размеров возмущений плотности имеет определённые основания. Здесь можно привести такие аргументы, как отмеченные в работе большие (несколько минут) времена задержки начала уменьшения ПЭС после включения

волны накачки и задержка начала его восстановления после её выключения даже в области максимальной мощности излучения волны накачки, а также обнаруженное в [21] появление дактов плотности плазмы во внешней ионосфере при нагреве F_2 -области в утренние часы. Поиск более явных и прямых доказательств появления вариаций плотности плазмы в дневной ионосфере на высотах выше максимума F_2 -области будет продолжен в наших последующих экспериментах.

Важным свойством наблюдаемых в эксперименте вариаций ПЭС является их быстрый переход от положительного к отрицательному значениям его приращений через несколько минут после начала нагрева. Это может быть интерпретировано как разрушение дефокусирующей линзы, происходящее за счёт развития на высотах 130÷170 км неоднородностей плотности плазмы, генерация которых наблюдалась в [27]. Заметим, что именно возбуждаемые при нагреве верхней части F_2 -области сильные неоднородности плотности плазмы не позволяют наблюдать во время модификации ионосферы влияния формирующейся здесь фокусирующей линзы.

На вариации ПЭС могут, вообще говоря, оказывать своё влияние искусственные крупномасштабные неоднородности плотности плазмы с $l_{\perp} \geq 1$ км, появляющиеся вблизи уровня отражения волны накачки либо в результате развития самофокусирующей неустойчивости мощной короткой радиоволны, либо усиления естественных или остаточного уровня искусственных неоднородностей. Развитие таких неоднородностей может происходить уже при достаточно низком уровне мощности волны накачки $P_{эфф} \approx 1 \div 10$ МВт, приводя, например, к появлению искусственного F_{spread} на ионограммах, хорошо обнаруживаемого в условия модификации ионосферы в вечерние и ночные часы [1]. Однако в условиях проведения наших измерений появление интенсивного F_{spread} не отмечалось: за исключением одного случая (см. сеанс № 8) он был либо слабого или умеренного уровня, либо вообще отсутствовал. Это позволяет заключить, что интенсивность генерируемых крупномасштабных неоднородностей плотности плазмы не превышала (1÷3) %, и они не могли оказывать существенного влияния на регистрируемые вариации ПЭС.

2) Смещение области регистрации наиболее интенсивных вариаций ПЭС к югу относительно центра диаграммы направленности излучения мощной радиоволны. Наиболее интенсивные вариации регистрировались в основном в южной части возмущённой области, между магнитным зенитом для волны накачки и направлением на магнитный зенит (а иногда даже южнее магнитного зенита далеко за контуром $0,1P_0$, где эффективная мощность волны накачки не превышала 1 МВт. При этом уменьшение ПЭС часто не обнаруживалось севернее центра ориентированной в магнитный зенит для волны накачки диаграммы направленности, где мощность электромагнитной волны была достаточно высока и нагрев плазмы должен, казалось бы, приводить к заметному изменению величины ПЭС.

Одна из возможностей объяснения такой ситуации связана с учётом влияния эффекта «магнитного зенита» на взаимодействие мощной электромагнитной волны О-поляризации с магнитоактивной плазмой, как это рассматривалось в [12]. Развитие этого эффекта естественным образом происходит в области магнитного зенита для волны накачки, но с появлением южнее этой области неоднородностей плотности плазмы, которые могут каналировать энергию мощной радиоволны до уровня верхнегибридного резонанса, возможна, как указывалось в [12, 19], эффективная модификация F_2 -области ионосферы мощными волнами, распространяющимися сразу вдоль линий геомагнитного поля. При этом большие времена развития неоднородностей в области магнитного зенита объясняются тем, что в этом направлении волна накачки излучается лишь с небольшой мощностью, и требуется длительный нагрев плазмы, чтобы образовались неоднородности достаточной интенсивности. Таким образом, пространство между магнитным зенитом для волны накачки и магнитным зенитом оказывается выделенным с точки зрения наиболее эффективного взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой и генерации здесь искусственной ионосферной турбулентности. Заметим, что усиление вариаций ПЭС с приближением луча зре-

ния на спутник к области магнитного зенита наблюдалось также в [17–19].

При интерпретации наблюдаемых вариаций ПЭС в области между магнитным зенитом для волны накачки и магнитным зенитом, кроме рассмотренных выше факторов, следует также учитывать особенности наклонного распространения радиоволн, что приводит к появлению в южной части возмущённой области каустик [29], в которых имеет место усиление напряжённости электрического поля и, следовательно, интенсификация нагрева и развития неоднородностей плотности плазмы.

3) Появление второй гармоники в спектре вариаций ПЭС. Как было отмечено в [24], появление нечётных (3-ей и 5-ой) гармоник основной периодики в спектре регистрируемого сигнала может определяться спектром излучения мощной радиоволны, когда используется амплитудная модуляция типа симметричный меандр, для которого длительность излучения равна длительности паузы. Но в спектре такого сигнала отсутствует вторая гармоника, которая часто обнаруживается в эксперименте. Согласно [23] амплитудная модуляция интенсивности излучения мощной короткой радиоволны при существующей квадратичной зависимости возмущений температуры электронов от напряжённости электрического поля вызывает модуляцию температуры электронов плазмы не только на частоте модуляции, но и на второй, а при достаточно интенсивной волне, — и на более высоких гармониках. Ясно, что при этом генерация гармоник будет наиболее эффективна при большей напряжённости электрического поля волны накачки, или в области магнитного зенита для волны накачки, куда была ориентирована диаграмма направленности излучения. Это соответствует полученным экспериментальным данным, хотя остаётся неясным, почему нет совпадения областей максимальной генерации вариаций ПЭС на основной частоте и на её гармониках. Подробный анализ всех наблюдаемых здесь эффектов выходит за рамки настоящей работы и, кроме того, требует наличия более широкого набора экспериментальных данных, полученных в различных ионосферных условиях при различных частотах модуляции мощной радиоволны.

Подводя итоги результатов выполненных исследований по модификации мощным коротковолновым радиоизлучением О-поляризации освещённой Солнцем ионосферы, мы можем констатировать следующее: 1) установлено, что и в дневное время вариации ПЭС могут иметь большие значения, достигая величины до 0,1 TECU; 2) определен характер вариаций ПЭС и показано, что они могут отвечать как росту, так и уменьшению его величины, являясь проявлением нескольких процессов, протекающих параллельно в возмущённой ионосфере; 3) показано, что увеличение величины ПЭС связано с формированием на высотах 130÷180 км дефокусирующей линзы с увеличенной плотностью плазмы; 4) на основании полученных результатов сделано предположение, что уменьшение величины ПЭС может быть связано с заметным уменьшением концентрации плазмы вплоть до высот внешней ионосферы; 5) продемонстрировано, что в результате нелинейной зависимости величины нагрева электронов от напряжённости электромагнитного поля волны накачки в возмущённой ионосфере происходит генерация возмущений плотности плазмы на второй гармонике частоты модуляции мощной радиоволны.

Прояснение остающихся вопросов требует проведения новых целенаправленных экспериментов с учётом опыта уже выполненных исследований и с использованием специальных режимов излучения волны накачки. За исключением формирования дефокусирующей линзы [22], разработка механизмов генерации возмущений плотности плазмы вне центральной части возмущённой области, в которой происходит её сильный нагрев и возбуждение наиболее интенсивной искусственной ионосферной турбулентности, сегодня ещё далека от завершения. В частности, остаются неясными причины, приводящие к генерации неоднородностей плотности плазмы на высотах 130÷180 км (намного ниже высоты отражения волны накачки) [27, 28] и во внешней ионосфере (намного выше высоты отражения волны накачки) [20, 21], а также высокие ($10^6 \div 10^7$ см/с) скоро-

сти распространения плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля [26–28].

В заключение обратим внимание на возможное влияние перемещающихся ионосферных возмущений с характерными временами более 20 мин, которые хорошо идентифицируются на приведённых в работе вейвлет-спектрах, на развитие искусственных вариаций плотности плазмы. Из представленных в работе результатов измерений можно видеть не только имеющее место совпадение во времени наиболее интенсивных перемещающихся ионосферных возмущений и искусственных периодик, но и наблюдающееся при этом расширение спектра временных масштабов возмущений плотности плазмы. Влияние перемещающихся ионосферных возмущений на генерацию искусственных ионосферных неоднородностей отмечалось ранее, например, в [30]. В этом направлении еще только предстоит выполнить необходимые исследования.

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам стенда «Сура» за помощь в проведении экспериментов. Работа проводилась при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08–05–00676, 08–02–00171, 09–02–00257, 10–05–01126) и программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (государственные контракты П167 и П1072).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11.
2. J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44, No. 12.
3. J. Atmos. Terr. Phys. 1985. V. 47, No. 12.
4. J. Atmos. Terr. Phys. 1997. V. 59, No. 18.
5. Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 5.
6. Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 7–8.
7. Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 9.
8. Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11.
9. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
10. Leyser T. B. // Space Sci. Rev. 2001. V. 98. P. 223.
11. Stubbe P., Hagfors T. // Surveys in Geophysics. 1997. V. 18. P. 57.
12. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
13. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // УФН. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
14. Беликович В. В., Грач С. М., Караштин А. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545.
15. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Metelev S. A., Sergeev E. N. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59, No. 18. P. 2317.
16. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Gurevich A. V., et al. // Phys. Lett. A. 2004. V. 325. P. 381.
17. Терещенко Е. Д., Миличенко А. Н., Фролов В. Л., Юрик Р. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 934.
18. Milikh G., Gurevich A., Zybin K., Secan J. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. P. L22102.
19. Gurevich A., Fremouw T., Secan J., Zybin K. // Phys. Lett. A. 2002. V. 301. P. 307.
20. Рапопорт В. О., Фролов В. Л., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 709.
21. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, вып. 12. С. 908.
22. Бойко Г. Н., Васьков В. В., Голян С. Ф. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 8. С. 960.

23. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973.
24. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Vasiliev A. E., et al. // Adv. Space Res. 2010. doi:10.1016/j.asr.2010.03.031.
25. Алимов В. А., Выборнов Ф. И., Караштин А. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 3. С. 207.
26. Фролов В. Л., Сергеев Е. Н., Штуббе П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 2. С. 121.
27. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Вяхирев В. Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 5–6. С. 338.
28. Бахметьева Н. В., Игнатъев Ю. А., Дмитриев С. А., Шавин П. Б. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1992. Т. 32. С. 180.
29. Бочкарев Г. С., Егоров И. Б., Ерёменко В. А. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1980. Т. 20, № 5. С. 848.
30. Wright J. W., Копка Н., Stubbe P. // Geophys. Res. Lett. 1988. V. 15, No. 13. P. 1531.

Поступила в редакцию 14 мая 2010 г.; принята в печать 29 июля 2010 г.

SOUNDING OF THE IONOSPHERE DISTURBED BY THE “SURA” HEATING FACILITY RADIATION USING SIGNALS OF THE GPS NAVIGATION SATELLITES

V. L. Frolov, G. P. Komrakov, V. E. Kunitsyn, A. M. Padokhin, A. E. Vasiliev, and G. A. Kurbatov

We present the results of experimental studies of the properties of the plasma-density disturbances created during heating of the ionospheric F_2 region by high-power HF radio waves radiated by the “Sura” heating facility (Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod). These experiments are specific in that they were performed in a sunlit (daytime) ionosphere when the generation of ionospheric turbulence has specific features and the turbulence intensity level is low enough. The plasma-density disturbances induced by high-power HF radio emission were sounded by signals of the GPS navigation satellites, the line of sight to which crossed different parts of the disturbed ionosphere region. Threshold powers of the excitation of artificial plasma-density variations as well as spatial, temporal, spectral, and energy characteristics of the generated disturbances are determined.