

УДК 550.388.2+533.951+537.868

О ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРИЗАЦИИ СЛОЯ F_2 ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ, ВОЗМУЩЁННОЙ МОЩНЫМ КОРОТКОВОЛНОВЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

Е. Д. Терещенко¹, В. А. Турянский¹, Б. З. Худукон¹, Р. Ю. Юрик¹, В. Л. Фролов^{2,3*}

¹ Полярный геофизический институт, г. Мурманск;

² Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Представлены результаты исследования характеристик искусственных плазменных структур, возбуждаемых в F_2 -области ионосферы при её модификации мощными короткими радиоволнами. Эксперименты были проведены на нагревном стенде «Сура» с помощью спутникового радиопросвечивания ионосферы; восстановление профиля концентрации плазмы было выполнено с максимально возможным на сегодня пространственным разрешением около 4 км. В направлении, близком к магнитному зениту для волны накачки, наблюдаются следующие явления: формирование полости с пониженной на 15 % концентрацией плазмы на высотах максимума F_2 -слоя и ниже; формирование области с повышенной на 12 % концентрацией плазмы на высотах больше 400 км. Также при длительном квазипериодическом воздействии волны накачки на ионосферу над стендом «Сура» образуются волнообразные крупномасштабные возмущения электронной концентрации (меридиональный масштаб $\lambda_x \approx 130$ км; вертикальный масштаб $\lambda_z \approx 440$ км), которые могут быть обусловлены модуляцией концентрации плазмы искусственной акустико-гравитационной волной с периодом 10,6 мин, формируемой тепловым источником внутри крупномасштабной полости с пониженной концентрацией плазмы. Имеет место генерация неоднородностей концентрации электронов с $\Delta N_e/N_e \approx 3\%$ в виде слоёв с размерами вдоль геомагнитного поля 10–12 км и примерно 24 км поперёк него, которые обнаруживаются как ниже, так и выше максимума F_2 -слоя. Обсуждаются механизмы образования данных плазменных структур.

ВВЕДЕНИЕ

Модификация ионосферы мощными короткими радиоволнами с обыкновенной поляризацией (о-мода) в условиях их отражения в F_2 -области приводит к резонансному возбуждению собственных колебаний плазмы вблизи высоты отражения волны накачки. Плазменные волны вызывают нагрев плазмы (температура электронов может увеличиваться на 200–300 %) и ускорение электронов до энергий 5–25 эВ [1–3]. Ускорение электронов может происходить в области плазменного резонанса вследствие передачи им энергии от ленгмюровских волн и в области верхнегибридного резонанса при затухании верхнегибридных плазменных колебаний. Первый процесс локализуется вблизи высоты отражения волны накачки, где её частота f_0 совпадает с плазменной частотой электронов f_{pe} ($f_0 = f_{pe}$), и электроны ускоряются в основном вдоль магнитного поля [1, 4]. На высоте верхнегибридного резонанса (несколько ниже уровня отражения мощной радиоволны) выполняется условие $f_0 = (f_{pe}^2 + f_{ce}^2)^{1/2} = f_{UH}$, где f_{ce} — электронная циклотронная частота. Ускорение электронов верхнегибридными волнами происходит преимущественно поперёк магнитных силовых линий [1, 5–7]. Ускоренные электроны (с энергиями 2 эВ и более) вызывают нагрев плазмы, стимулируют появление продольных токов и усиление свечения ионосферы (эмиссии с длинами волн 630 и 557,7 нм и др.) в высотном диапазоне 220–280 км [7, 8].

* frolov@nirfi.unn.ru

Вблизи высоты отражения волны накачки также происходит развитие неоднородностей концентрации плазмы с различными масштабами от долей метра до десятков километров [9–15]. Возмущения электронной концентрации N_e , как показывают наблюдения, обнаруживаются от E -слоя ионосферы до высот, значительно превышающих высоту максимума F_2 -слоя [12, 16–18]. Выполненные многочисленные исследования позволили построить достаточно полную картину генерации искусственных ионосферных неоднородностей с различными масштабами от долей метра до десятка километров и определить механизмы их возбуждения в различных участках их пространственного спектра.

Помимо указанных неоднородностей концентрации плазмы, как в возмущённых, так и в относительно спокойных геомагнитных условиях на ионосферных высотах в полярных и средних широтах систематически регистрируются среднемасштабные (по классификации в работе [19]) перемещающиеся ионосферные возмущения с горизонтальными длинами волн λ_x порядка сотен километров [20]. Временные масштабы этих возмущений близки к периоду Брента–Вяйсяля, что свидетельствует о резонансном механизме их генерации и их связи с возбуждением внутренних гравитационных волн.

В нагревных экспериментах появление подобных квазипериодических вариаций в доплеровских смещениях частоты диагностических коротковолновых сигналов (периоды $10 \div 20$ мин), типичных для среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений, обычно связывают с волновыми возмущениями естественного происхождения, проходящими через искусственно возмущённую область ионосферы [21]. Однако, как показано в работах [12, 22, 23], при воздействии на ионосферу мощным периодическим радиоизлучением также возможна генерация акустико-гравитационных волн с периодами $20 \div 60$ мин, которые могут распространяться на расстояние до 1 000 км и более от стенда. В настоящее время нет полной ясности, какие физические процессы лежат в основе генерации таких перемещающихся ионосферных возмущений, которые связывают с возбуждением внутренних гравитационных волн при периодической модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением нагревных стендов.

Применение спутникового радиопросвечивания ионосферы [18, 24] даёт возможность получать высотно-широтные разрезы крупномасштабных плазменных структур при модификации ионосферы. Прогресс в развитии средств вычислительной техники в последние годы позволяет обрабатывать большие массивы данных и проводить томографическое восстановление структуры ионосферы с пространственным разрешением до $2 \div 3$ км по высоте и широте.

Целью данной работы является изучение искусственной пространственной структуризации профиля концентрации плазмы с разрешением около 4 км на основе данных, полученных в эксперименте по радиопросвечиванию F_2 -области ионосферы, возмущённой мощным радиоизлучением стенда «Сура», сигналами навигационного спутника.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Спутниковые данные по зондированию возмущённой области ионосферы сигналами низкоорбитальных спутников были получены на радиотомографической установке Полярного геофизического института (ПГИ) во время нагревной кампании, проводимой в средних широтах на стенде «Сура» в августе 2005 года. Результаты этих экспериментов были частично представлены в работе [11]. При анализе полученных данных тогда использовался метод обработки с пространственным разрешением $15 \div 20$ км, и вариации концентрации плазмы с меньшими масштабами либо имели недостаточную достоверность, либо не были выявлены из-за ограниченных возможностей вычислительных средств. В данной работе детально анализируется сеанс нагрева 15 августа, когда стенд излучал в течение интервала времени $17:07 \div 17:22$ UT ($T_{UT} = T_{MSK} - 4$ час)

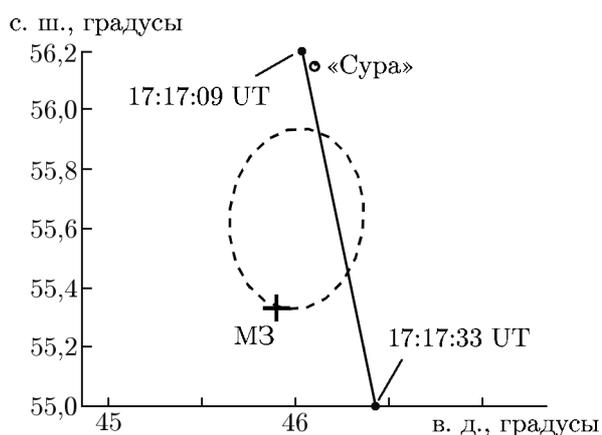


Рис. 1. Проекция траектории искусственного спутника Земли и сечения диаграммы направленности антенны нагревной установки на ионосферный уровень 280 км (МЗ — магнитный зенит для местоположения стенда «Сура»)

интенсивных искусственных ионосферных неоднородностей с масштабами от нескольких сотен метров до нескольких километров. Следует также отметить, что до этого сеанса нагрева стенд с 15:11 до 17:00 UT работал в режиме 4 мин — излучение, 6 мин — пауза с эффективной мощностью 55 МВт.

Для исследования пространственного распределения электронной концентрации в возмущённой области над стендом «Сура» были установлены три спутниковых приёмника вдоль проекции траектории спутника на поверхность Земли. Приёмники были расположены на территории стенда ($56,15^\circ$ с. ш., $46,11^\circ$ в. д.), в г. Урень ($57,47^\circ$ с. ш., $45,79^\circ$ в. д.) и в д. Мурзино ($55,27^\circ$ с. ш., $46,26^\circ$ в. д.). Сигналы радиомаяков навигационных спутников на когерентных частотах 150 и 400 МГц принимались двумя совмещёнными антеннами с круговой поляризацией, имеющими в вертикальной плоскости широкую диаграмму направленности (150° по уровню 3 дБ). В эксперименте использовались промышленные навигационные приёмники АДК-3М с дополнительным оснащением следующими устройствами: стандартным аналого-цифровым преобразователем L-305, блоками фазового детектора и выделения телеметрии. Сигнал на частоте 400 МГц приводился к частоте 150 МГц и использовался как опорный в квадратурном фазовом детекторе, полоса аналоговых низкочастотных фильтров на входе аналого-цифрового преобразователя составляла $80 \div 100$ Гц. Две комплексные компоненты сигнала 150 МГц использовались для вычисления его амплитуды и фазы (фазовая ошибка составляла меньше $0,2^\circ$). Кроме того, в приёмнике имелся отдельный канал прямого амплитудного детектирования сигнала 150 МГц, который позволял контролировать качество амплитуды сигнала, рассчитанного из квадратур. Принципы преобразования спутниковых сигналов в указанном типе промышленного приёмника и перечень его основных технических характеристик (чувствительность, коэффициенты усиления трактов и пр.) подробно рассмотрены в соответствующей литературе, см., например, работу [18].

Высота орбиты спутника составляла около 1 000 км, наклонение орбиты 83° , период обращения 105 мин. На рис. 1 показано сечение диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн на уровне отражения волны накачки и траектория подионосферной точки движения спутника. Видно, что в данном сеансе лучи в направлении от приёмников на спутник пересекали облучаемую передающей антенной стенда «Сура» область ионосферы вблизи её центра.

волну с обыкновенной поляризацией на частоте 4544 кГц, эффективная мощность излучения составляла 100 МВт. Измерения выполнялись в слабо возмущённых геомагнитных условиях ($K_p \approx 2,5$). Диаграмма передающей антенны с шириной 15° была наклонена на 12° к югу от вертикали (в область «магнитного зенита» для волны накачки, когда на высоте верхнегибридного резонанса выполняется условие распространения мощной радиоволны вдоль силовых линий геомагнитного поля), что обеспечивало более эффективное возбуждение искусственной ионосферной турбулентности [1]. Согласно ионосферным данным, перед рассматриваемым в работе нагревным сеансом критическая частота слоя F_2 f_{0F_2} была около 4,7 МГц. За время излучения мощной радиоволны наблюдалось развитие сильного F -рассеяния, что свидетельствует о генера-

Высотно-широтное распределение электронной концентрации в модифицированной ионосфере получено томографическим методом обработки фазы спутниковых радиосигналов [25], основанном на вероятностном (байесовском) подходе [26]. Реконструкция электронной концентрации проводилась в линейном приближении с помощью томографического пакета программ «Tmeas», разработанного совместно в ПГИ и геофизической обсерватории в г. Соданкюла (Финляндия) [27]. Выбор томографической сетки реконструкции с минимально допустимым шагом проводился на основании оценок рефракции волны зондирования для ионосферных условий в период наблюдений. Расчёт в диапазоне широт реконструкции, согласно работе [28], для критической частоты 4,7 МГц даёт максимальное смещение луча на спутник $1,5 \div 2,0$ км. Таким образом, при использовании сетки с пикселом 4×4 км не происходит выхода траектории луча за пределы клетки дискретного разбиения. Цифровая низкочастотная фильтрация исходных данных позволяет ограничить размеры неоднородностей в реконструкции в соответствии с используемой томографической сеткой ($l \geq 4$ км). Дифракционными эффектами при этом можно пренебречь, т. к. в данном случае радиус зоны Френеля $\rho_1 \ll \ll 4$ км.

Для оценки погрешностей реконструкции, кроме выявления в ней отрицательных «нефизичных» значений концентрации N_e , вычислялись так называемые «обратные» фазы путём интегрирования реконструкции, полученной с выбранной томографической сеткой. Фазы, полученные из реконструкции, сравнивались с экспериментальными фазами и, если различия были больше $1 \div 3$ %, то вычисления многократно повторялись с другими параметрами регуляризации (параметрами начального слоя) до получения приемлемого результата, когда ошибки в метриках не превышают размеров пиксела используемой сетки [25].

Томографическая реконструкция электронной концентрации во время пролёта спутника над приёмными станциями 15.08.2005 представлена на рис. 2. Реконструкция N_e имеет явно выраженные структурные признаки модификации ионосферы: на высотно-широтном распределении N_e в пределах диаграммы направленности передающей антенны в максимуме F_2 -слоя обнаруживается искусственная полость со значительным уменьшением концентрации плазмы (до 15 % от фонового значения). Данная полость сформировалась после воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением в течение 10,5 мин до пролёта спутника через центральную часть диаграммы направленности антенны стенда. Толщина ионосферного слоя, в котором выполняется условие $f_{pe} \geq f_0 \geq f_{UH}$ и возможно резонансное взаимодействие волны накачки с плазменными волнами (см. рис. 2, белые линии), возрастает в широтном направлении от краёв данного сечения диаграммы направленности к центру от $8 \div 10$ км до $55 \div 60$ км. Оценка высоты отражения вблизи магнитного зенита для волны накачки по измерениям ионозонда стенда «Сура» в данном эксперименте составляет $h \approx 275 \div 280$ км. В соответствии с высотно-широтным распределением концентрации

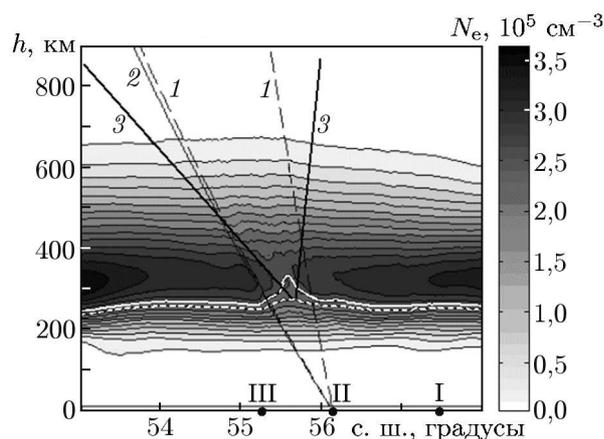
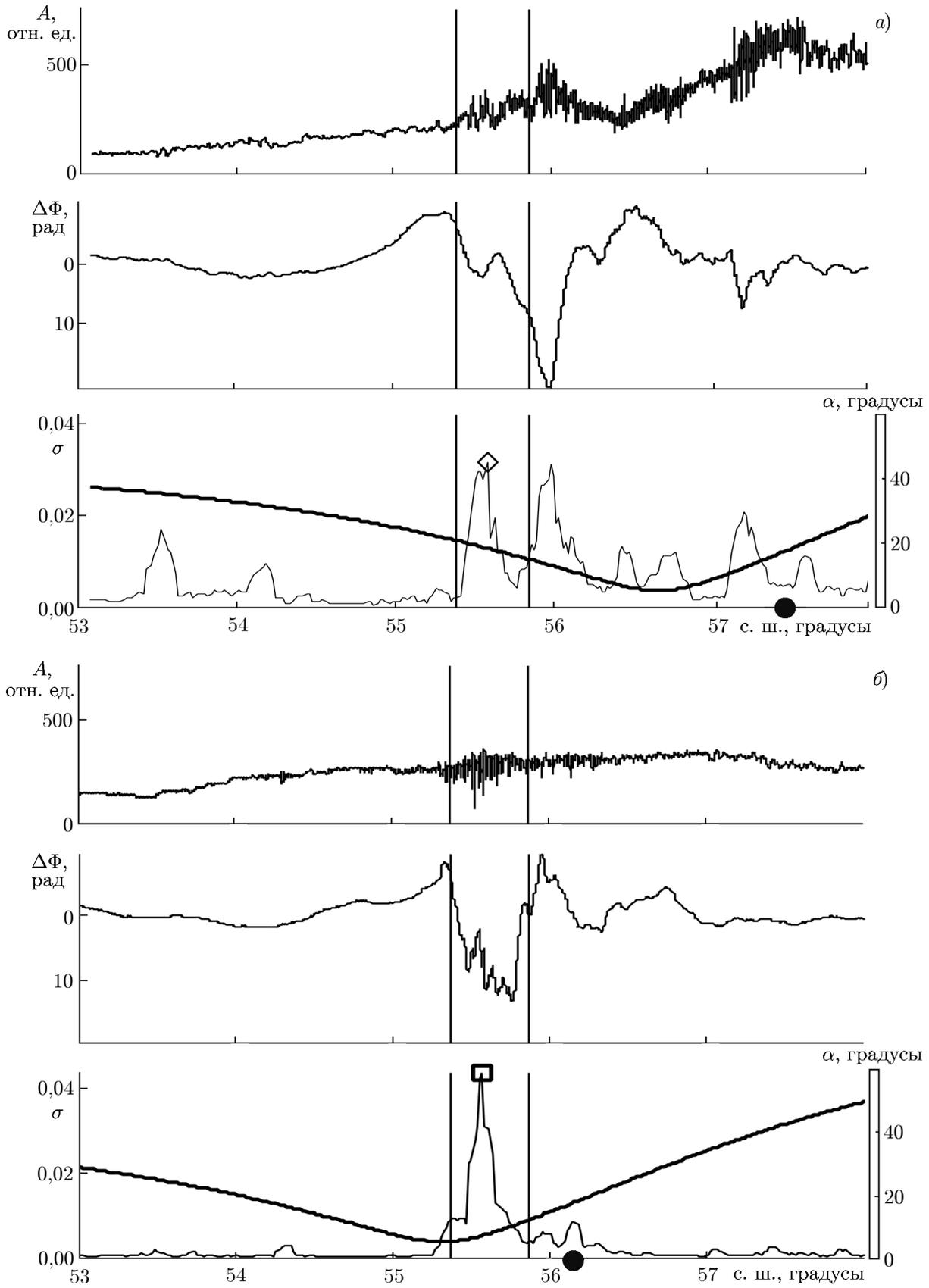


Рис. 2. Высотно-широтное распределение концентрации N_e в 17:16:33 UT 15.08.2005. Штриховыми линиями 1 показана диаграмма направленности нагревной установки, сплошной линией 2 — силовая линия магнитного поля, белые линии соответствуют изолиниям N_e , где $f_0 = f_{pe}$ (сплошная линия) и $f_0 = f_{UH}$ (штриховая линия); толстыми расходящимися линиями 3 ограничена область вариаций, соответствующая крупномасштабной высотной вариации концентрации плазмы. На горизонтальной оси чёрными кругами отмечено расположение пунктов Урень (I), «Сура» (II) и Мурзино (III)



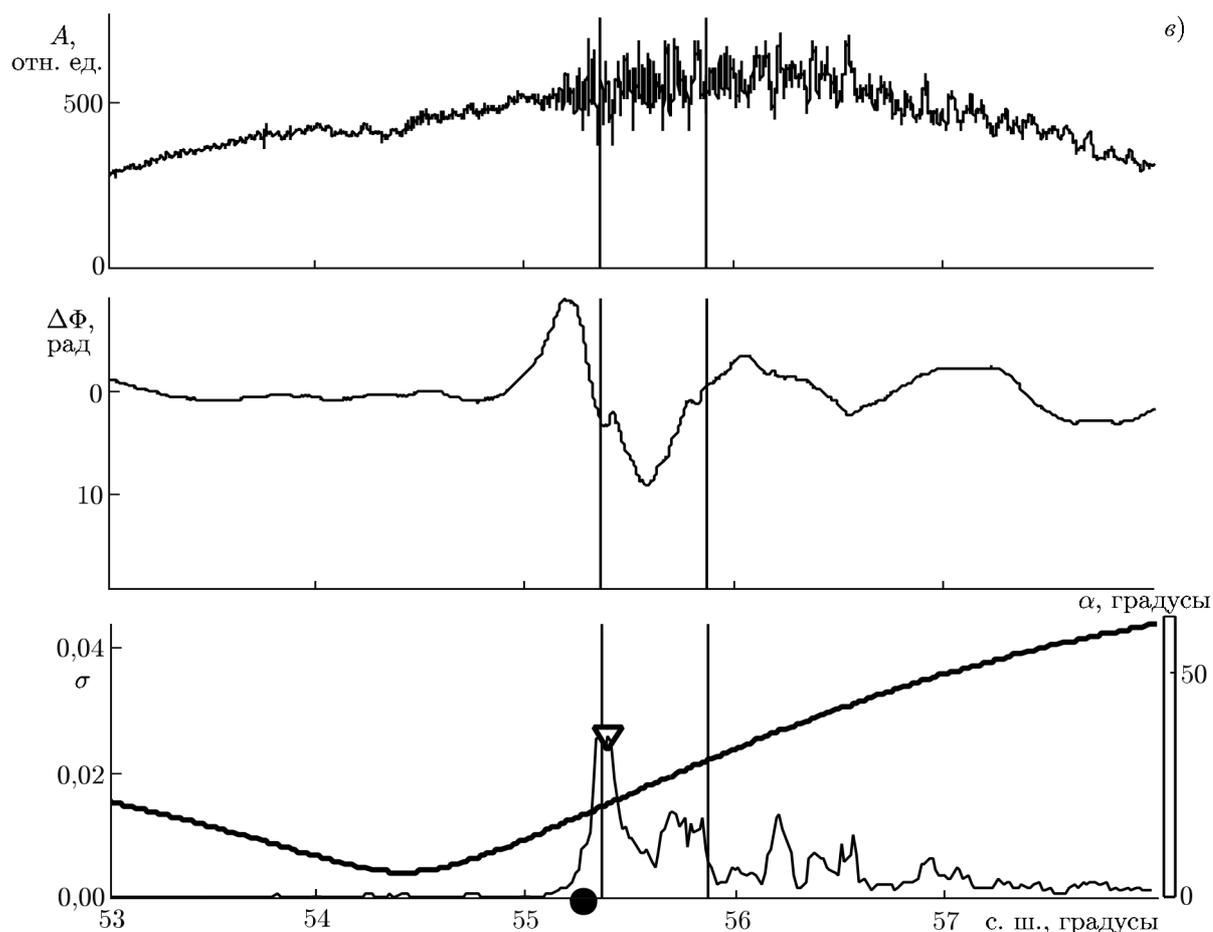


Рис. 3. Спутниковые сигналы, зарегистрированные в пунктах Урень (а) «Сура» (б) и Мурзино (в) в 17:08 UT 15.08.2005. Здесь A — амплитуда, $\Delta\Phi$ — вариация фазы, σ — дисперсия амплитуды. Горизонтальная ось соответствует широте на высоте 280 км, чёрными кругами отмечено расположение приёмных пунктов. На панелях с широтным распределением σ маркером показано положение максимума дисперсии, вертикальными линиями — границы диаграммы направленности передающей антенны стенда, толстой линией — значение угла α между магнитным полем и направлением на искусственный спутник Земли

электронов (рис. 2), высота невозмущённого уровня ионосферы, от которого может отражаться волна с частотой 4544 кГц при вертикальном распространении, составляет $h \approx 240 \div 250$ км на достаточном удалении от зоны модификации по широте. Это согласуется с данными ионозонда в период, предшествующий включению стенда в режиме несущей ($h \approx 240$ км).

Максимум дисперсии вариаций амплитуд спутниковых радиосигналов, зарегистрированных приёмником в пункте «Сура» (рис. 3), наблюдался в направлении, близком к магнитному зениту для волны накачки. Это свидетельствует о генерации на данном направлении наиболее интенсивных искусственных мелкомасштабных структур концентрации N_e с масштабом поперёк геомагнитного поля $l_{\perp} \approx 50 \div 100$ м, вытянутых вдоль силовых линий магнитного поля, анизотропных в поперечном направлении и интенсивно рассеивающих радиоволны на частоте 150 МГц [29]. Поскольку в направлении магнитного зенита участок изолинии концентрации N_e , где $f_0 \approx f_{pe}$, практически ортогонален магнитному полю в пределах углового сектора с размером около 3° , то здесь приближённо выполняется условие нормального падения на слой о-моды волны накачки,

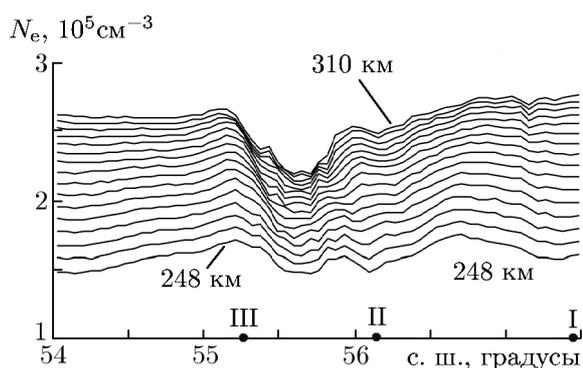


Рис. 4. Широтные профили концентрации электронов при воздействии на ионосферу мощного коротковолнового радиоизлучения 15.08.2005, $h = 248 \div 310$ км, шаг по высоте составляет 4 км. На горизонтальной оси чёрными кругами отмечено расположение пунктов Урень (I), «Сура» (II) и Мурзино (III)

ионосферу волны накачки, так и генерацию волнообразных вариаций N_e . Эти вариации ярче проявляются к северу от диаграммы направленности излучения стенда и, возможно, вызваны модуляцией концентрации плазмы меридиональной компонентой акустико-гравитационной волны с длиной $\lambda_x \approx 130$ км, распространяющейся от зоны наиболее сильной модификации ионосферы. Следует также отметить, что на расстоянии порядка λ_x к северу от источника возмущения линия постоянной фазы близка к вертикали с небольшим наклоном к северу; это может свидетельствовать о волноводном характере распространения возмущения. Данный волновой процесс при этом занимает высотный интервал до уровня 700 км (см. рис. 2). Поскольку ионосфера во время пролёта спутника над модифицированной F_2 -областью была полностью освещена Солнцем (вечерний терминатор проходил ниже стратосферных высот, т. е. на расстоянии 2000 км от нагревной зоны для высотного уровня 300 км), то можно утверждать, что генерация данной волны обусловлена реакцией ионосферы на включение мощного радиоизлучения.

Как следует из рис. 4, плазменные возмущения имеют вид волновых цугов, сходных по структуре с временными вариациями доплеровского смещения частоты радиосигналов доплеровского радара вертикального зондирования и сигналов некогерентного рассеяния, регистрируемых над г. Харьков в периоды воздействия на ионосферу мощным периодическим излучением стенда «Сура» [22, 23, 30].

В нашем случае на формирование источника волнового возмущения, по-видимому, оказала влияние работа стенда с 15:11 до 17:00 UT в режиме 4 мин — излучение, 6 мин — пауза (период воздействия 10 мин). Крупномасштабная структура возмущённой зоны выше уровня максимума F_2 -слоя имеет достаточно чёткие южную и северную границы, которые визуализируются как «ступеньки» на изолиниях высотно-широтного распределения N_e . На высотах $h > 400$ км эти «ступеньки» выходят за пределы диаграммы направленности примерно симметрично относительно среднего направления между силовой линией магнитного поля для стенда «Сура» и направлением на максимум диаграммы направленности излучающей антенны стенда. Амплитуда «ступенек» достигает $16 \div 20$ км в пределах сектора, обозначенного толстыми линиями на рис. 2, с раствором примерно $\pm 14^\circ$. Стороны этого сектора сходятся на высоте $280 \div 290$ км внутри искусственной полости с пониженной концентрацией N_e .

которая достигает уровня верхнегибридного резонанса. Это и приводит к генерации в резонансной области сильно вытянутых вдоль поля мелкомасштабных ($l_\perp \leq 70$ м) искусственных ионосферных неоднородностей [1].

На широтных профилях концентрации N_e в диапазоне высот $248 \div 310$ км (рис. 4) можно видеть вытянутые вдоль направления геомагнитного поля крупномасштабные волнообразные структуры, регистрирующиеся в обширной области пространства над стендом, которая значительно шире главного лепестка диаграммы направленности антенны его нагревной установки. Этот результат практически аналогичен полученному в работе [24] и иллюстрирует как процесс «выдавливания» плазмы за пределы полости в результате развития верхнегибридной турбулентности при длительном воздействии на ионосферу

Поскольку скорость низкоорбитального спутника Земли более чем на порядок превышает скорость звука на ионосферных высотах, то в первом приближении можно считать перемещающиеся ионосферные возмущения типа акустико-гравитационных волн (при данном методе их регистрации) квазистационарными пространственными структурами. Это позволяет по профилям вариаций N_e (см. рис. 5) оценить основные параметры волнового возмущения концентрации электронов, вызванного модификацией ионосферы. Амплитуда вариации концентрации плазмы ΔN_e максимальна ($\Delta N_e \approx -6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$) на высоте около 310 км в направлении на центр диаграммы направленности (штриховая линия 2) и минимальна ($\Delta N_e \approx -2 \cdot 10^4 - 3$) для профиля, соответствующего северной границе диаграммы направленности (линия 3, точки); на профиле, полученном в направлении магнитного зенита для стенда «Сура» (сплошная тонкая линия 1), амплитуда вариации $\Delta N_e \approx -4 \cdot 10^4 - 3$ близка к среднему значению N_e (толстая линия). Выше 400 км амплитуда вариаций положительна: $\Delta N_e \approx 2 \cdot 10^4 - 3$. Данные вариации концентрации электронов имеют достаточно чёткую квазипериодическую структуру с масштабом $\lambda_z/2 \approx 220 \text{ км}$ в пределах диаграммы направленности стенда. Здесь нужно отметить, что на высотах внешней ионосферы в нагревных экспериментах при длительном воздействии волны накачки часто наблюдаются дакты — вытянутые вдоль магнитного поля крупномасштабные неоднородности [31]. Увеличение концентрации электронов в дактах составляет примерно $20 \div 40 \%$, а их поперечный размер $80 \div 100 \text{ км}$. Эти величины близки к вариации электронной концентрации и пространственному масштабу области этой вариации, наблюдаемой в нашем случае на высотах более 400 км. Возможно, существует причинно-следственная связь между возбуждением акустико-гравитационной волны и формированием дактов.

Если распространение возмущения имеет волновую природу, то, при использовании оценки фазовой скорости ($V \approx 690 \text{ м/с}$) выше максимума F -области, в нашем случае квазипериод волны можно оценить величиной $T = \lambda_z/V \approx 10,6 \text{ мин}$ (период Брента–Вяйсяля для данных условий $T_g \approx 8,6 \text{ мин}$). Нужно отметить, что данная оценка периода возмущения плазмы близка к периоду излучения мощной радиоволны в предшествующий пролёту спутника интервал времени. Изолинии электронной концентрации (рис. 2) на высотном-широтном распределении N_e можно рассматривать как индикатор волновых возмущений плазмы. Топология изолиний N_e выше главного максимума в окрестности данного сечения диаграммы направленности стенда указывает на возмущение концентрации плазмы, которое может быть вызвано распространяющейся наклонно вверх акустико-гравитационной волной от высотного слоя $280 \div 290 \text{ км}$, находящегося внутри искусственной полости с концентрацией плазмы меньше фоновых значений.

Механизм генерации волновых возмущений может быть связан с локальным нагревом электронов внутри искусственной полости — области резонансного взаимодействия волны накачки

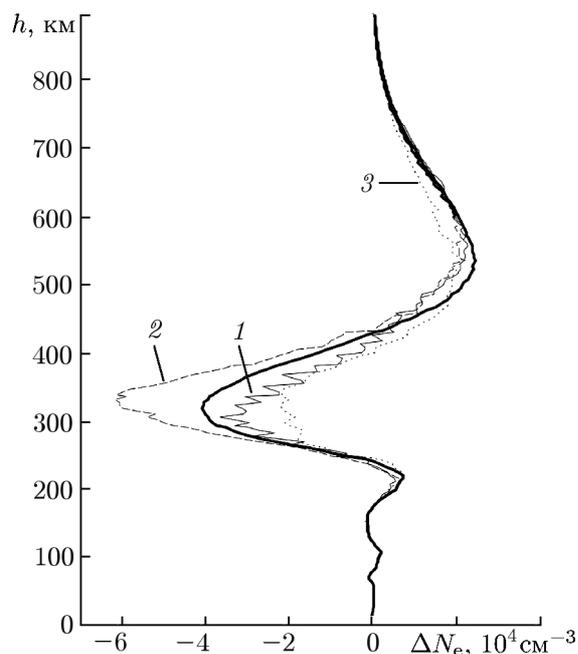


Рис. 5. Высотные вариации N_e в пределах диаграммы направленности стенда «Сура». Кривые 1, 2 и 3 отвечают наклонным профилям в направлении магнитного зенита, максимума диаграммы направленности стенда и северного края диаграммы направленности, соответственно. Толстая кривая — среднее значение N_e

с плазменными волнами. При этом часть энергии надтепловых электронов передаётся ионам и нейтральной компоненте атмосферы [32, 33], что может быть причиной искусственного волнового процесса с периодом, близким к периодам собственных колебаний атмосферы. Усилению эффективности нагрева атмосферы при воздействии волны накачки на плазму может способствовать также и эффект магнитного зенита [1, 16]. Согласно теоретическим оценкам [32, 33] эффективность теплового источника при квазипериодическом режиме излучения мощной радиоволны с частотами импульсов $\Omega \leq 0,01 \text{ с}^{-1}$ достаточна для генерации внутренних гравитационных волн и связанных с ними ионосферных неоднородностей электронной концентрации [34].

Как следует из рис. 5, крупномасштабная вариация концентрации плазмы, выходящая за пределы диаграммы направленности, в интервале высот 280÷550 км достигает максимального значения $\delta N_e/N_e \approx \pm 0,17$. Это достаточно близко к вариациям концентрации нейтральных частиц, полученным из спутниковых наблюдений акустико-гравитационных волн естественного происхождения [35]: для атомарного кислорода $\delta N_O/N_O \approx \pm 0,15$. Если ступенчатые изгибы изолиний N_e на реконструкции (см. рис. 2) сформировались в результате волнового движения среды, то смещение по высоте на 16÷20 км соответствует вертикальной скорости частиц $V_z \approx 50\div 60 \text{ м/с}$ при условии, что время формирования волнового источника много меньше периода волны. Такие скорости также характерны для акустико-гравитационных волн на высотах F_2 -области [35].

В данном томографическом сечении ионосферы (примерно вдоль геомагнитного меридиана) волнообразные возмущения N_e с масштабами $\lambda_x \approx 130$ и $\lambda_z \approx 440$ км могут быть обусловлены увлечением плазмы гравитационной волной, распространяющейся за пределами нагревной зоны к северу и наклонно вверх с зенитным углом $\theta \approx 73^\circ$, т. е. практически ортогонально силовым линиям магнитного поля.

В условиях длительного воздействия мощной радиоволны на ионосферу вблизи высоты отражения возбуждаются параметрические неустойчивости, приводящие почти к полному поглощению энергии волны плазмой и её сильному нагреву [1]. Наиболее интенсивные искусственные ионосферные неоднородности всех масштабов генерируются в области магнитного зенита для волны накачки, при этом наклон диаграммы направленности антенны в плоскости геомагнитного меридиана на 12° к югу от вертикали обеспечивает эффективный нагрев плазмы за счёт распространения мощной радиоволны вдоль силовых линий магнитного поля на высоте верхнегибридного резонанса [12, 16].

Таким образом, генерация гравитационной волны в случае теплового источника должна определяться нагревом плазмы преимущественно в области верхнегибридного резонанса, т. е. распределением волновой энергии о-моды в искусственной ионосферной полости (каверне) и термодиффузионными процессами в плазме.

2. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Согласно полученным данным спутникового радиопросвечивания ионосферы (15.08.2005), при длительном (около 10,5 мин) воздействии мощной радиоволной с обыкновенной поляризацией на плазму F_2 -слоя (наклон диаграммы направленности на 12° к югу в направлении магнитного зенита для волны накачки) на высотах вблизи высоты отражения волны накачки и несколько ниже её (260÷320 км) в пределах диаграммы направленности пучка мощных радиоволн формируется вытянутая вдоль геомагнитного поля крупномасштабная полость с уменьшенной на 15% концентрацией плазмы.

В условиях, когда перед пролётом спутника над стендом «Сура» стенд излучал периодическую последовательность импульсов в режиме 4 мин — излучение, 6 мин — пауза (период воздействия 10 мин), была обнаружена генерация волновых структур с периодом 10,6 мин, немного

превышавшим период Брента—Вяйсяля на ионосферных высотах [24]. В нашем случае выделенные вне области модификации компоненты волны (с длинами волн $\lambda_x \approx 130$ и $\lambda_z \approx 440$ км) могут относиться к акустико-гравитационной волне с периодом $T \approx 10,6$ мин, генерируемой тепловым источником, который, как было установлено, находится внутри искусственной ионосферной полости. Приведённые выше оценки параметров волнового возмущения не противоречат прогностическим диаграммам распространения акустико-гравитационных волн в вертикально-неоднородной атмосфере [36].

На реконструкции высотно-широтного распределения электронной концентрации (см. рис. 5, профиль 1) в диапазоне высот 280÷450 км удалось выделить флуктуации с пониженной на 2÷3% концентрацией электронов относительно невозмущённого значения с масштабами 10÷12 км вдоль магнитного поля и 24 км в поперечном к нему направлении. Достаточно чёткая локализация этих слоистых структур ниже и выше максимума F_2 -области в направлении магнитного зенита для волны накачки свидетельствует о том, что время их релаксации заведомо больше времени радиопросвечивания (1 мин) спутником области модификации. Подобные неоднородности концентрации электронов с примерно в два раза меньшими продольными и поперечными масштабами наблюдались на стенде в Аресибо в ракетном эксперименте [37] при пересечении ракетой околозенитной области модифицированной ионосферы как выше, так и ниже уровня отражения мощной волны.

Максимум дисперсии амплитуд спутниковых радиосигналов для приёмного пункта «Сура» (рис. 3) приходится на направление, соответствующее магнитному зениту для волны накачки. Этот результат прямо указывает на развитие на этом направлении наиболее интенсивных искусственных ионосферных неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 1$ км. Это подтверждается генерацией в данном эксперименте интенсивного F -рассеяния, которое определяется неоднородностями тех же масштабов [38]. В ночных условиях развитие таких среднемасштабных искусственных ионосферных неоднородностей может приводить к включению естественного механизма их генерации, что проявляется в сохранении F -рассеяния в течение длительного времени уже в отсутствие модификации ионосферы [12]. Вопрос о природе обнаруженных в наших измерениях слоистых структур нуждается в дополнительных исследованиях. В них определяющее значение имеет проведение спутниковых экспериментов (радиопросвечивание с помощью как низкоорбитальных, так и высокоорбитальных спутников) с последующим построением радиотомографических реконструкций электронной концентрации с максимально возможным высотно-широтным разрешением структур плазменных возмущений и выявлением соответствующих им временных вариаций.

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам стенда «Сура» за оказанную помощь в проведении экспериментальных исследований. Работа В. Л. Фролова в части анализа полученных экспериментальных данных была выполнена за счёт средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Работа Е. Д. Терещенко и Р. Ю. Юрика была выполнена при поддержке РФФИ (гранты 15-05-02437-а и 16-05-01024-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич А. В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
2. Carlson H. C., Wickwar V. B., Mantas G. P. // J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44, No. 12. P. 1089.
3. Leyser T. B., Gustavsson B., et al. // Adv. Polar Upper Atmos. Res. 2000. V. 14. P. 1.
4. DuBois D. F., Rose A. H., Russel D. // J. Geophys. Res. 1990. V. 95, no. A12. P. 21221.

5. Васьков В. В., Гуревич А. В. // Журн. exper. теор. физ. 1977. Т. 73, № 3. С. 923.
6. Robinson T. R. // Phys. Reports. 1989. V. 179, No. 2–3. P. 79.
7. Грач С. М., Митяков Н. А., Трахтенгерц В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27, № 9. С. 1096.
8. Bernhard P. A., Tepley C. A., Duncan L. M. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94, No. A7. P. 9071.
9. Kosch M. J., Rietveld M. T., Hagfors T., Layser T. B. // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27, No. 17. P. 2817.
10. Gurevich A., Fremouw E., Secan J., Zybin K. // Phys. Lett. A. 2002. V. 301, No. 3–4. P. 307.
11. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В. и др. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
12. Фролов В. Л. // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 2. С. 33.
13. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
14. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Metelev S. A., Sergeev E. N. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59, No. 18. P. 2317.
15. Мясников Е. Н., Муравьёва Н. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 722.
16. Gurevich A. V., Zybin K. P., Carlson H. C., Pedersen T. // Phys. Lett. A. 2002. V. 305, No. 5. P. 264.
17. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Rietveld M. T., Brekke A. // Ann. Geophys. 1998. V. 16, No. 7. P. 812.
18. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Gurevich A. V., et al. // Phys. Lett. A. 2004. V. 325, No. 5–6. P. 381.
19. Francis S. H. // J. Atmos. Terr. Phys. 1975. V. 37. P. 1011.
20. Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., et al. // J. Geophys. Res. 1995. V. 100, No. A12. P. 23993.
21. Благовещенская Н. Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. С. 82.
22. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 4. С. 219.
23. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 307.
24. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L., et al. // Radio Sci. 2012. V. 47, No. 3. Art. no. RSOL15.
25. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D. Ionospheric tomography. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 260 p.
26. Markkanen M., Lehtinen M., Nygrén T., et al. // Ann. Geophysicae. 1995. V. 13, No. 12. P. 1277.
27. Nygrén T., Markkanen M., Lehtinen M., et al. // Radio Sci. 1997. V. 32, No. 6. P. 2359.
28. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д. Томография ионосферы. М.: Наука, 1991. 176 с.
29. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Kozlova M. O., Nygrén T. // Ann. Geophys. 1999. V. 17, No. 4. P. 508.
30. Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 4. С. 280.
31. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Шорохова Е. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 3. С. 198.
32. Григорьев Г. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 12. С. 1801.
33. Mishin E., Sutton E., Milikh G., et al. // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39, No. 1. Art. no. L11101.
34. Гершман Б. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 12. С. 1571.
35. Федоренко А. К. // Геомаг. и аэрономия. 2010. Т. 50, № 1. С. 111.
36. Лизунов Г. В., Леонтьев А. Ю. // Геомаг. и аэрономия. 2014. Т. 54, № 6. С. 834.
37. Kelley M. C., Arce T. L., Salowe J., et al. // J. Geophys. Res. 1995. V. 100, No. A9. P. 17367.
38. Djuth F. T., Reinisch B. W., et al. // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33, No. 4. Art. no. L04107.

Поступила в редакцию 19 сентября 2016 г.; принята в печать 30 июня 2017 г.

**ON SPATIAL STRUCTURING OF THE F_2 LAYER STUDIED
BY THE SATELLITE RADIO SOUNDING OF THE IONOSPHERE DISTURBED
BY HIGH-POWER HF RADIO WAVES**

E. D. Tereshchenko, V. A. Turyansky, B. Z. Khudukon, R. Yu. Yurik, and V. L. Frolov

We present the results of studying the characteristics of artificial plasma structures excited in the ionospheric F_2 region modified by high-power HF radio waves. The experiments were carried out at the Sura heating facility using satellite radio sounding of the ionosphere. The plasma density profile was reconstructed with the highest possible spatial resolution for today, about 4 km. In a direction close to the magnetic zenith of the pump wave, the following phenomena were observed: the formation of a cavity with a 15% lower plasma density at the altitudes of the F_2 layer and below; the formation of an area with plasma density increased by 12% at altitudes greater than 400 km. With a long-term quasiperiodic impact of the pump wave on the ionosphere, wavy large-scale electron-density perturbations (the meridional scale $\lambda_x \approx 130$ km and the vertical scale $\lambda_z \approx 440$ km) are also formed above the Sura facility. These perturbations can be due to the plasma density modulation by an artificial acoustic-gravity wave with a period of 10.6 m, which was formed by the heat source inside a large-scale cavity with low plasma density; there is generation of the electron density irregularities for the electrons with $\Delta N_e/N_e \approx 3\%$ in the form of layers having the sizes 10–12 km along and about 24 km across the geomagnetic field, which are found both below and above the F_2 -layer maximum. The mechanisms of the formation of these plasma structures are discussed.