

УДК 524.1+550.3

ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ОБЛАСТИ F_2 ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КОРОТКИМИ РАДИОВОЛНАМИ

В. Л. Фролов^{1,3*}, Е. А. Шорохова¹, В. Е. Кунницын², Е. С. Андреева², А. М. Падохин²

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

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

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

В работе представлены результаты выполненных в последние годы на стенде «Сура» исследований свойств крупномасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых при модификации F_2 -области ионосферы мощными короткими радиоволнами. Показано, что на высоте отражения волны накачки крупномасштабные неоднородности наиболее эффективно генерируются в области «магнитного зенита». Обнаружен эффект усиления генерации крупномасштабных неоднородностей на краю пучка мощных радиоволн. Представлены результаты исследований крупномасштабных неоднородностей на высотах внешней ионосферы. Суммированы результаты исследований генерации внутренних гравитационных волн на ионосферных высотах при периодическом нагреве ионосферной плазмы мощным радиоизлучением и обсуждается возможное влияние этих волн на генерацию неоднородностей на больших расстояниях от нагревного стенда.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 1960-х годов в СССР [1, 2], а позднее в США [3, 4] и Норвегии [5], проводились интенсивные исследования модификации ионосферы мощными радиоволнами на специально построенных радиопередающих устройствах — нагревных стендах. За более чем 50-летний период этих исследований были детально изучены свойства различных высокочастотных и низкочастотных составляющих искусственной ионосферной турбулентности, возбуждаемой при модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением. В частности, было обнаружено, что нагрев ионосферной плазмы мощными радиоволнами с обыкновенной (О) поляризацией, излучаемыми в вертикальном или близком к вертикальному направлении, вызывает генерацию искусственных ионосферных неоднородностей. Поперечный по отношению к геомагнитному полю $l_{\perp}$ размер этих неоднородностей составляет величины от долей метра до десятков километров. Согласно установившейся в нагревных экспериментах терминологии, мы будем относить неоднородности с размерами $l_{\perp} \leq 30 \div 50$ м к мелкомасштабным, их механизм генерации связан с развитием тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости [6–9]; неоднородности с $l_{\perp}$ от нескольких сотен метров до $2 \div 3$ км — к среднемасштабным, их механизм генерации связан с развитием самофокусирующей неустойчивости мощных радиоволн в плазме [10, 11]; неоднородности с $l_{\perp}$ от нескольких до $10 \div 20$ километров — к крупномасштабным неоднородностям, развитие которых, скорее всего, связано с усилением естественных неоднородностей при нагреве плазмы мощными радиоволнами [12].

Следует также выделять неоднородности плазмы, возникающие за счёт изменения её концентрации в масштабе диаграммы направленности пучка мощных радиоволн; эти неоднородности могут иметь размеры от нескольких десятков до сотни километров. К этому типу возмущений

* frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru

относится формирование в дневной ионосфере дефокусирующей линзы на высотах $130\div 180$ км за счёт изменения ионизационно-рекомбинационного баланса в нагретой мощной радиоволновой плазме [13, 14], а также фокусирующей линзы на высотах $200\div 400$ км вследствие термодиффузионного перераспределения нагретой плазмы в F_2 -области ионосферы [14, 15]. Кроме того, за счёт стрикционного и теплового давления наблюдается изменение профиля концентрации плазмы вблизи высоты отражения волны накачки [16, 17]. Заметим, что в условиях дневной ионосферы совместное влияние более высокого уровня регулярного поглощения радиоволн в нижней ионосфере (в D - и E -слоях) и дефокусировки радиоволн на дефокусирующей линзе приводит к тому, что интенсивность потока излучения мощной радиоволны на уровне F_2 -области может быть ослаблена более, чем на 20 дБ по сравнению со случаем её распространения в свободном пространстве. Кроме того, дневная ионосфера характеризуется более высоким уровнем концентрации фотоэлектронов (это вызывает более сильное затухание плазменных волн и, следовательно, уменьшение эффективности генерации параметрических неустойчивостей) и более низкой высотой максимума F_2 -слоя ионосферы (с этим связана более высокая концентрация в этом слое нейтральных частиц, что обуславливает дополнительное поглощение энергии волны накачки [14]). Все эти факторы уменьшают эффективность взаимодействия мощной радиоволны с плазмой верхней ионосферы и приводят к генерации заметно более слабой ионосферной турбулентности при модификации дневной ионосферы по сравнению с нагревом плазмы в вечерних и ночных условиях.

Выполненные на стенде «Сура» (Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород) за прошедшие десятилетия исследования охватывали изучение свойств искусственных неоднородностей всех масштабов, но при этом большее внимание в них уделялось изучению характеристик мелкомасштабных и среднемасштабных неоднородностей. Для этих неоднородностей были определены механизмы генерации, измерены временные и спектральные характеристики, найдены условия более эффективного возбуждения [12, 18–22].

Целью данной работы является анализ полученных в последние годы на стенде «Сура» новых экспериментальных данных о свойствах крупномасштабных неоднородностей с размерами $l_{\perp}$ от нескольких до десятков километров. Изучение их характеристик проводилось с помощью методов зондирования ионосферы, основанных на её просвечивании сигналами высокоорбитальных и низкоорбитальных спутников, измерения характеристик плазменных возмущений бортовой аппаратурой спутников, зондирования ионосферы пробными радиоволнами и др.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Характеристики полости с пониженной концентрацией плазмы (фокусирующей линзы), образующейся при модификации F_2 -области ионосферы мощными короткими радиоволнами

В последнее время на стенде «Сура» широко используется метод зондирования возмущённой области ионосферы радиосигналами спутников навигационных систем GPS/GLONASS на частотах в диапазоне $1,2\div 1,6$ ГГц [23, 24]. Приём сигналов этих спутников ведётся с помощью нескольких двухчастотных приёмников, установленных как на территории нагревного стенда «Сура» (координаты стенда: $56,15^{\circ}$ с. ш., $46,1^{\circ}$ в. д.), так и вокруг него на расстоянии до нескольких десятков километров. В ряде случаев приёмники могли располагаться на удалении до $100\div 500$ км от стенда. При проведении измерений частота дискретизации регистрируемых сигналов выбиралась не меньше 1 Гц. В случае спутника навигационной системы GPS для анализа брались фазовые данные, получаемые на обеих частотах сигналов: 1 575,42 МГц (канал L1) и 1 227,6 МГц

(канал L2), которые использовались для вычисления относительного наклонного полного электронного содержания (ПЭС) по лучу спутник—приёмник. Из полученных временных рядов ПЭС с использованием метода скользящего среднего с окном 20 мин удалялся тренд, после чего характеристики полученных вариаций ПЭС дополнительно изучались с помощью вейвлет-анализа с целью выявления в них периодических вариаций (периодик), определения времени их существования и соответствия временных вариаций ПЭС режиму работы стенда «Сура».

Зондирование возмущённой области ионосферы радиосигналами спутников навигационных систем GPS/ГЛОНАСС позволяет получать данные об изменениях концентрации плазмы на луче зрения приёмник—спутник. При этом могут регистрироваться искусственные неоднородности с горизонтальными размерами от нескольких до десятков километров и больше (вплоть до размеров возмущённой области). Это позволяет изучать характеристики развития километровых неоднородностей в различных частях возмущённой мощным коротковолновым радиоизлучением ионосферы, в частности, особенности их генерации в области «магнитного зенита».

На рис. 1 приведены результаты измерений вариаций ПЭС (измеренные значения за вычетом некоторой постоянной и значения с удалённым трендом, СПЭС, чёрные и серые линии соответственно) в двух пунктах: на стенде «Сура» (рис. 1а) и в приёмном пункте, развёрнутом в г. Воротынец в 20 км к юго-западу от стенда (рис. 1б). Измерения были выполнены 23.08.2010 между двенадцатью и часом ночи местного времени в условиях, когда наблюдалось наиболее интенсивное возбуждение крупномасштабных неоднородностей. Стенд излучал волны О-поляризации на частоте 4300 кГц с эффективной мощностью 50 МВт в режиме 6 мин — излучение, 6 мин — пауза; интервалы излучения отмечены прямоугольниками на оси абсцисс. Диаграмма направленности излучения стенда была наклонена на 12° от вертикали на юг, т. е. была ориентирована в область «магнитного зенита» для волны накачки. В этой области излучённые стендом «Сура» мощные радиоволны с учётом их рефракции в ионосфере распространяются вдоль силовых линий геомагнитного поля на уровне верхнегибридного резонанса. Это обеспечивает их более интенсивное взаимодействие с плазмой и более сильный её разогрев за счёт эффекта «магнитного зенита» [9, 25]. Эксперименты проводились в спокойных геомагнитных условиях, суммарный K_p -индекс, ΣK_p , равнялся 9^- .

В рассматриваемом сеансе проекция луча зрения на спутник из пункта наблюдения «Сура», отнесённая в ионосфере к высоте отражения мощной радиоволны ($h_{\text{отр}} \approx 250$ км), проходила через центр диаграммы направленности излучения мощных радиоволн, т. е. практически через точку «магнитного зенита» для волны накачки, которая находится примерно на 25 км севернее точки «магнитного зенита», определяемой направлением вектора проходящего через стенд геомагнитного поля. Для пункта Воротынец такая траектория проходила на 20 км юго-западнее траектории спутника для пункта «Сура», т. е. между точками «магнитного зенита» для волны накачки и «магнитного зенита» для проходящей через стенд «Сура» геомагнитной силовой линии.

Из представленных на рис. 1 результатов измерений хорошо видно следующее. Для пункта «Сура» во время сеансов нагрева ионосферы 20:43–20:49 UT и 20:55–21:01 UT ($T_{\text{МСК}} = T_{\text{УТ}} + 4$ часа), когда луч приёмник—спутник на высоте отражения волны накачки проходил близко к центру диаграммы направленности пучка мощных радиоволн, регистрируется сильное уменьшение ПЭС примерно на 0,17 и 0,14 TECU соответственно ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$). Это происходит на фоне увеличения ПЭС на 0,1 TECU на интервале времени 20:30–21:00 UT, которое здесь имеет, скорее всего, естественный характер. Уменьшение ПЭС начиналось почти сразу после включения излучения волны накачки в первом сеансе и с задержкой около 1 мин во втором и характеризовалось временем $\tau \approx 1$ мин. После выключения излучения волны накачки в 20:49 UT восстановление ПЭС проходило с характерным временем $\tau_{\text{рел}} \approx 3$ мин и за время паузы 6 мин ПЭС практически

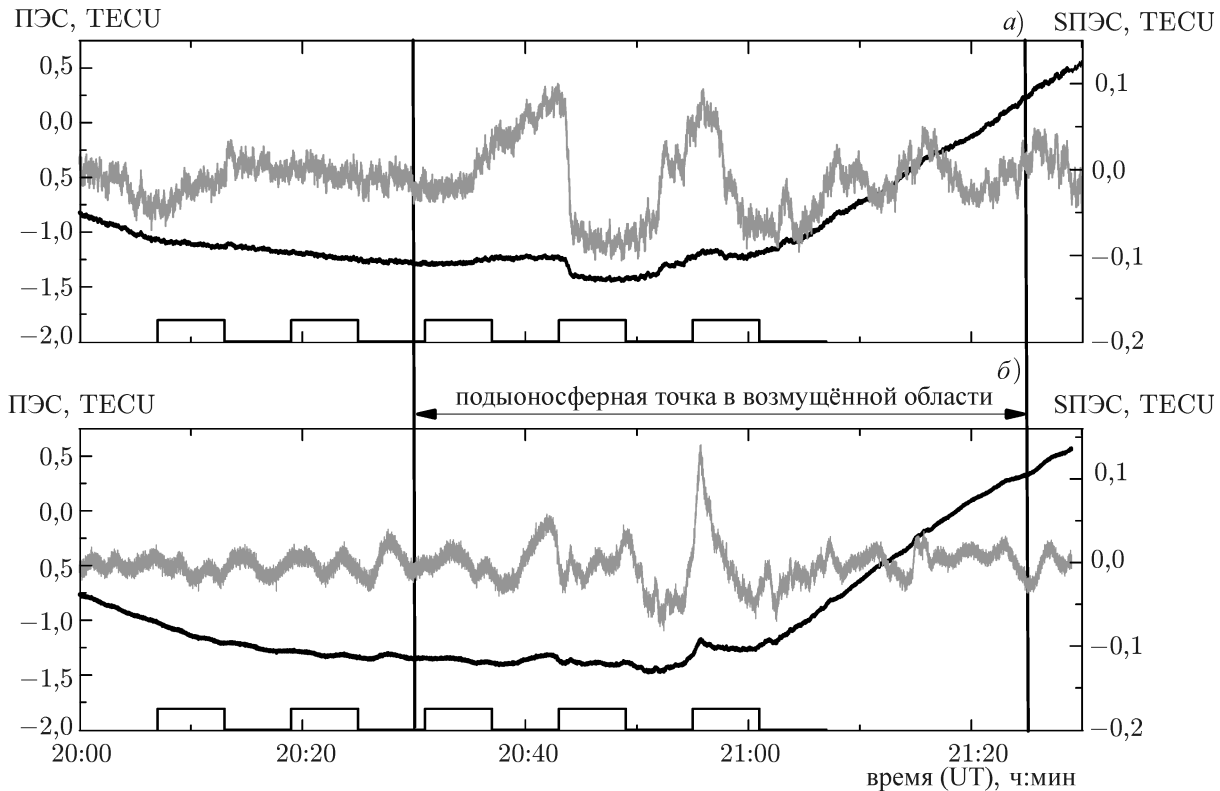


Рис. 1. Результаты измерения вариаций ПЭС в пункте «Сура» (а) и в пункте Воротынец (б). Чёрные линии соответствуют относительным значениям измеренного ПЭС, серые — значениям с удалённым трендом

полностью достигало невозмущённого уровня. Следует отметить, что за 12 мин до этого в сеансе нагрева 20:31–20:37 UT какого-либо уменьшения ПЭС не наблюдалось и оно было более слабым в сеансе 20:55–21:01 UT по сравнению с сеансом 20:43–20:49 UT.

Сказанное выше позволяет оценить размеры области с наиболее сильным уменьшением концентрации плазмы как $30 \div 40$ км вдоль орбиты спутника (в направлении с юго-запада на северо-восток вблизи центра диаграммы направленности излучения мощных радиоволн). Заметим, что, согласно результатам радиотомографических исследований пространственной структуры возмущённой области ионосферы [20], поперечный относительно геомагнитного поля размер области с пониженной концентрацией плазмы (т. е. фокусирующей линзы) составляет $30 \div 50$ км, её продольные размеры при этом достигают $150 \div 250$ км. С учётом таких продольных размеров полученные данные позволяют оценить величину относительного уменьшения концентрации плазмы в центре диаграммы направленности. Для этого сеанса оно составляет $\delta N = \Delta N / N \approx 6\%$. Невысокие значения δN могут объясняться как не слишком большой эффективной мощностью излучения волны накачки (около 50 МВт), так и большой разницей (около 1,2 МГц) между частотой мощной радиоволны ($f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц) и критической частотой F_2 -слоя ионосферы ($f_{0F_2} \approx 5,5$ МГц). При такой разнице частот эффективность модификации ионосферы оказывается заметно ниже, чем когда значение $f_{\text{ВН}}$ лишь немного меньше f_{0F_2} [22].

Из сравнения результатов измерений в двух пунктах видно следующее. В пункте Воротынец, для которого в сеансе 20:43–20:49 UT проекция движения спутника на высоте 250 км проходит примерно на 25 км западнее центра диаграммы направленности, не наблюдается уменьшения ПЭС, хотя здесь регистрируется усиленный фон вариаций ПЭС, которые можно отнести к искусственным, т. е. вызванным модификацией ионосферы. Эти вариации ПЭС, однако, не корре-

лированн с режимом излучения мощной радиоволны. И только в сеансе 20:55–21:01 UT, когда зондировалась область примерно на 20 км юго-западнее центра диаграммы направленности, появилось сильное уменьшение ПЭС, практически повторяющее его поведение для пункта «Сура». Отсюда можно сделать вывод, что область с сильным уменьшением ПЭС в юго-западном направлении имеет размеры не менее 30 км. Заметим, что, согласно [23], такая полость с дефицитом концентрации плазмы, как правило, не обнаруживается на северном крае возмущённой области. Последнее свидетельствует о том, что наблюдаемое явление относится только к области «магнитного зенита» для волны накачки.

Представленные на рис. 1 результаты соответствуют полуночным часам проведения экспериментов с достаточно короткими паузами (в данном случае 6 мин) между сеансами излучения волны накачки. При этом, считая продольные размеры этой полости вдоль луча зрения на спутник равным примерно 150 км, наблюдающееся короткое время её развития можно объяснить, только допустив, что вытеснение плазмы из этой полости происходит за счёт униполярной диффузии с коэффициентом продольной диффузии $D_{\parallel} \approx 10^{12}$ см²/с. Такие диффузионные процессы наблюдались как в ионосферной [26, 27], так и в лабораторной плазме [28, 29]. Однако здесь остаётся неясным имеющее место короткое (порядка 3 мин) время релаксации концентрации в этой полости столь больших размеров, поскольку, если неоднородность достигает стационарной стадии своего развития, данное время должно было бы быть не меньше 10 мин, как это, например, наблюдалось при исследовании свойств фокусирующей линзы [30] или при выносе крупномасштабных неоднородностей из области их генерации [31].

Образующаяся полость с дефицитом концентрации плазмы около 6 % с горизонтальными размерами порядка 50 км обладает свойствами фокусирующей линзы. Она может оказывать сильное влияние на распространение радиоволн различных частотных диапазонов и, как это было продемонстрировано в работе [32], на прохождение волны накачки во внешнюю ионосферу.

1.2. Особенности генерации крупномасштабных искусственных неоднородностей в области «магнитного зенита»

В качестве примера выполненных экспериментов на рис. 2 представлены результаты измерений за 28.08.2012, когда в поздние вечерние часы (16:40–18:30 UT) стенд излучал волны О-поляризации на частоте 4785 кГц ($f_{0F_2} \approx 5,9$ МГц) с мощностью $P_{\text{эфф}} \approx 100$ МВт в режиме 10 мин — излучение, 10 мин — пауза с наклоном диаграммы направленности 12° на юг (в область «магнитного зенита» для волны накачки). В этом сеансе луч зрения на спутник пересекал возмущённую область с юго-запада на северо-восток, проходя практически через центр диаграммы направленности пучка мощных радиоволн. Измерения выполнялись в спокойных геомагнитных условиях при $\Sigma K_p = 5^+$. Из результатов измерения ПЭС (см. рис. 2а) хорошо видно, что к юго-западу от центра диаграммы направленности пучка мощных радиоволн имеет место сильное (до 1 TECU) уменьшение ПЭС, что соответствует формированию полости с обеднённым содержанием плазмы (фокусирующей линзы). Для полного развития этой полости, возможно, не хватило 10 мин нагрева. Поскольку для соседних циклов нагрева эта полость уже не обнаруживается, то её размеры не должны превышать 40÷50 км вдоль проекции траектории движения спутника на высоту отражения волны накачки. Характерное время релаксации концентрации электронов в этой полости после выключения излучения волны накачки в 17:30 UT составляет 1,5 мин, т. е. релаксация проходит быстрее, чем в экспериментах, результаты которых представлены на рис. 1. Из значений ПЭС с удалённым трендом, представленных на рис. 2б, можно заключить, что внутри этой полости наблюдаются вариации ПЭС с практически постоянным периодом 2,5÷3 мин, их амплитуда изменяется в пределах $\pm 0,3$ TECU. Появление таких упорядоченных структур в об-

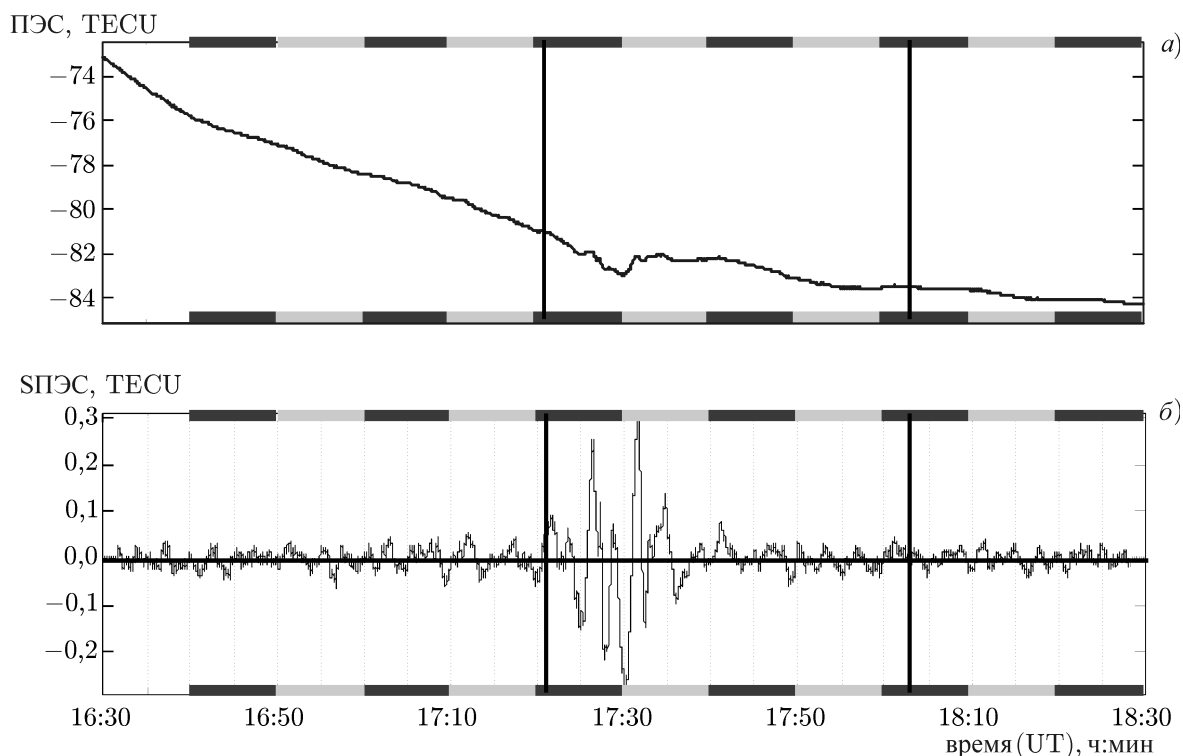


Рис. 2. Пример регистрации 28.08.2012, 20:40–22:30 MSK: вариации ПЭС (а), вариации ПЭС с удалённым трендом (б)

ласти «магнитного зенита» ранее отмечалось в работе [33]. Такое поведение ПЭС характерно для вечерних и ночных часов проведения измерений, когда луч зрения на спутник проходит близко к области «магнитного зенита».

Существенно более слабые вариации ПЭС (до 0,1 TECU) наблюдались как вблизи центральной части возмущённой области (17:35–17:50 UT), так и к юго-западу за диаграммой направленности излучения пучка мощных радиоволн (17:10–17:25 UT). Если неоднородности, которые обнаруживаются в $40 \div 50$ км к юго-западу от края диаграммы направленности, появляются там благодаря выносу плазмы за счёт дрейфа, как это наблюдалось авторами работы [31], то скорость дрейфа в этом направлении можно оценить как $20 \div 25$ м/с. Тогда, с учётом встречной скорости движения спутника по проекции его траектории на высоту отражения волны накачки $30 \div 35$ м/с, размер возбуждаемых в области «магнитного зенита» неоднородностей должен составлять $l_{\perp} \approx 6 \div 10$ км при размере самой полости вдоль траектории спутника около 50 км. Полагая, что размеры $L_{\parallel}$ полости и неоднородностей вдоль луча зрения на спутник равны $100 \div 200$ км и 30 км соответственно, по вариациям ПЭС можно оценить величину относительных флуктуаций концентрации плазмы δN : для полости и для неоднородностей с масштабом $l_{\perp} \approx 8$ км эта величина составляет около 25 % и 35 % соответственно. Уменьшение концентрации плазмы в полости соответствует результатам измерений [20]. Вычисленные достаточно высокие значения δN для крупномасштабных неоднородностей можно было бы уменьшить за счёт увеличения значений их продольных размеров. Однако приведённые выше оценки величины $L_{\parallel} \approx 30$ км представляются нам наиболее разумными, поскольку они соответствуют полученным в других экспериментах данным (см., например, работу [12]) и теоретическими оценками [14]. Согласно работе [9], высокие значения δN для неоднородностей здесь, возможно, являются следствием их очень сильного разогрева полем мощной радиоволны.

Представленные результаты измерений ясно демонстрируют следующее: 1) наиболее сильное

обеднение плазмы (до $20 \div 25$ %) имеет место не в центре диаграммы направленности излучения мощной радиоволны (в области «магнитного зенита» для волны накачки), а несколько юго-западнее от него (ближе к «магнитному зениту»); 2) горизонтальные размеры этой обеднённой полости можно оценить величиной 50 км вдоль орбиты спутника и 3) эта полость заполнена неоднородностями с размерами $l_{\perp} \approx 8$ км и с относительными флуктуациями концентрации плазмы в них $\delta N \approx 35$ %. Этим данная полость сильно отличается от остальной части возмущённой области, где возбуждение крупномасштабных неоднородностей выражено заметно слабее. Похожие результаты были получены также в работе [34].

Появление слабых флуктуаций ПЭС далеко к юго-западу от края диаграммы направленности антенны стенда, как это подробно обсуждалось в работе [35], может быть связано с выносом крупномасштабных неоднородностей из области их интенсивной генерации вдоль вектора скорости дрейфа плазмы до их попадания на линию приёмник—спутник. Из времени релаксации километровых неоднородностей $10 \div 20$ мин и возможной скорости дрейфа плазмы $25 \div 100$ м/с на высотах F_2 -области легко получить, что в условиях среднеширотной ионосферы расстояние, на которое могут переноситься такие неоднородности, составляет величину от нескольких десятков до сотни километров, что было подтверждено экспериментально в работе [31]. Ясно, что, с учётом переноса крупномасштабных неоднородностей внутри возмущённой области и их взаимного наложения в области зондирования, регистрируемые вариации ПЭС могут иметь сложную форму, которая не всегда будет коррелировать с модуляцией мощности волны накачки. При этом, когда в область зондирования приходят неоднородности из других частей возмущённой области ионосферы, важную роль будет играть распределение по ней интенсивности неоднородностей. С другой стороны, регистрируемое в эксперименте уменьшение интенсивности флуктуаций концентрации плазмы в центре возмущённой области на стадии их релаксации должно определяться не только временем распылывания неоднородностей за счёт диффузионных процессов, но и их сносом из места генерации по направлению вектора скорости дрейфа плазмы. Все это необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных данных, полученных при зондировании возмущённой области сигналами высокоорбитальных навигационных спутников.

Как было показано выше, в возмущённой области ионосферы существует выделенная область «магнитного зенита» для волны накачки с горизонтальными размерами около 50 км, в которой наблюдается в несколько раз более сильное уменьшение плотности плазмы, чем в остальных частях возмущённой области, и генерация интенсивных километровых неоднородностей. Из работ [33, 36, 37] также можно заключить, что здесь же наблюдается наиболее интенсивная генерация и неоднородностей с размерами $l_{\perp}$ от метров до километра, которые определяют ракурсное рассеяние радиоволн коротковолнового (КВ) и ультракоротковолнового (УКВ) диапазонов и дают наибольший вклад в мерцания УКВ сигналов, прошедших через возмущённую область ионосферы. Также в этой же области, согласно статье [38], имеет место наиболее сильный разогрев плазмы и более интенсивная генерация высокочастотной плазменной турбулентности. Эти свойства искусственной ионосферной турбулентности объясняются в теории «магнитного зенита» и нелинейного структурирования плазмы [9, 25]. Справедливость теории «магнитного зенита» неоднократно подтверждалась экспериментально (см., например, работы [39–41]).

Сильная локализованность области «магнитного зенита» с интенсивно развитыми неоднородностями объясняет то, что при зондировании возмущённой области сигналами спутников навигационных систем GPS/GLONASS и их приёме в пункте Галибиха в 50 км к северу от стенда «Сура» в большинстве случаев не наблюдается сильных искусственных вариаций ПЭС, вызванных модификацией ионосферы мощными КВ радиоволнами. Связано это с тем, что при наклоне диаграммы направленности на 12° на юг, который, как правило, используется в наших экспериментах, точка «магнитного зенита» для этого пункта находится вблизи северного края возмущён-

ной области, где искусственные неоднородности, если они и развиваются, то имеют невысокую интенсивность.

1.3. Эффект края диаграммы направленности

В работе [35] были детально проанализированы результаты сравнительных исследований генерации крупномасштабных неоднородностей с $l \approx 5 \div 10$ км при модификации среднеширотной F -области ионосферы мощными радиоволнами обыкновенной (О) или необыкновенной (Х) поляризации. Было показано, что в условиях вечерней и ночной ионосферы генерация таких неоднородностей при мощностях излучения волны накачки $100 \div 150$ МВт по крайней мере на порядок менее эффективна при нагреве ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации по сравнению с нагревом волнами О-поляризации. Однако использование в этих экспериментах волн Х-поляризации, для которых не выполняются условия их резонансного взаимодействия с плазмой и генерируемая турбулентность имеет низкую интенсивность, позволило обнаружить достаточно слабый эффект — эффект «края диаграммы направленности» пучка мощных радиоволн. Данный эффект заключается в том, что наиболее сильные вариации ПЭС (до $\pm(0,04 \div 0,06)$ TECU) регистрировались в условиях прохождения траектории луча зрения на спутник по касательной к краю возмущённой области, определяемому по уровню 0,5 от максимальной мощности. Необходимо отметить, что усиленная генерация крупномасштабных неоднородностей была зарегистрирована и при модификации ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации, хотя в этом случае она была не так ярко выражена из-за её маскировки возбуждаемыми интенсивными неоднородностями.

Как было показано в статье [35], усиление генерации крупномасштабных неоднородностей на краю диаграммы направленности пучка мощных радиоволн естественно связывать с более быстрым изменением интенсивности электрического поля мощной радиоволны в ортогональном к оси пучка направлении, а следовательно — с сильно неоднородным нагревом плазмы в этом направлении. Согласно работе [42] в этом случае наблюдается генерация соленоидальных токов, опоясывающих пучок мощных радиоволн, что может способствовать генерации крупномасштабных неоднородностей на его границе. Генерация таких токов недавно была экспериментально подтверждена в работах [43, 44].

1.4. Возмущения концентрации плазмы, регистрируемые на высотах внешней ионосферы (по данным спутника DEMETER)

Выполненные в 2005–2010 годах исследования свойств искусственных плазменных возмущений во внешней ионосфере на основе данных, полученных с помощью бортовой аппаратуры французского спутника DEMETER [32, 45–47], позволили заключить, что в условиях модификации ночной F_2 -области на высотах порядка 660 км наблюдается формирование сильных возмущений (дактов) с повышенной на $10 \div 40$ % концентрацией плазмы и с размерами около 100 км в поперечном к геомагнитному полю направлении. Эти дакты опираются на область с интенсивной искусственной ионосферной турбулентностью, генерируемой на высоте отражения мощных радиоволн О-поляризации. Их отличительной особенностью является наличие в них высокого уровня флуктуаций электромагнитных полей в диапазоне частот от нескольких Гц до десятков кГц, а также наблюдающееся в ряде случаев значительное (на десятки дБ) увеличение интенсивности сигналов от очень низкочастотных (ОНЧ) передатчиков и уширение их частотного спектра до $\pm(200 \div 500)$ Гц [47].

Как показал выполненный в последнее время более детальный анализ полученных с помощью спутника DEMETER экспериментальных данных, в большинстве случаев в дактах обнаруживаются сильные крупномасштабные возмущения концентрации плазмы с поперечными геомагнитному полю размерами порядка 20 км [48, 49]. При этом, как правило, увеличение концентрации плазмы в таких неоднородностях сопровождается увеличенной температурой электронов. Таким образом, дакты могут являться достаточно неоднородными образованиями и включать в себя до десятка неоднородностей концентрации плазмы с масштабами $l_{\perp} \approx 20$ км. Кроме того, согласно [47], дакты также заполнены и более мелкомасштабными неоднородностями с размерами $l_{\perp}$ от 10 м до 1 км. Более подробный анализ наблюдаемых вариаций плазменных параметров во внешней ионосфере Земли выходит за рамки данной работы и будет выполнен отдельно в работе [49].

1.5. Влияние искусственных волновых возмущений на генерацию ионосферных неоднородностей

В последние годы на стенде «Сура» проводились широкомасштабные исследования свойств волновых возмущений (или перемещающихся ионосферных возмущений), возбуждаемых при периодическом нагреве ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением; их результаты представлены в работах [50–52]. В этих экспериментах стенд излучал мощную радиоволну с амплитудной модуляцией типа «меандр» с периодом от 1 до 60 мин. Основываясь на этих исследованиях можно сделать следующие выводы.

1) Периодический нагрев верхней ионосферы мощным радиоизлучением на высотах 100÷500 км приводит к генерации или усилению волновых возмущений с периодом повторения, равным длительности цикла нагрев/пауза, которые хорошо регистрируются в ионосфере над г. Харьков (Украина) на расстоянии $R \approx 960$ км от стенда «Сура». В результате выполненных исследований было установлено, что наиболее эффективным режимом излучения стенда для генерации таких возмущений был режим, в котором для модификации ионосферы использовались радиоволны О-поляризации с эффективной мощностью излучения $P_G \geq 40$ МВт и длительными интервалами нагрева и паузы (15÷30 мин каждый), излучаемые в направлении «магнитного зенита» для волны накачки. Эффективность генерации волновых возмущений увеличивается при приближении частоты волны накачки к критической частоте f_{0F_2} . Воздействие мощными радиоволнами обеих поляризаций на нижнюю ионосферу не приводило к эффективной генерации волновых возмущений. Все это указывает на то, что источник их генерации находится в верхней (F -область) ионосфере и резонансное взаимодействие мощной радиоволны О-поляризации с плазмой играет здесь важную роль.

2) Скорость распространения волновых возмущений с периодами 20÷60 мин обычно составляла 300÷500 м/с на высотах $h \approx 120\div 300$ км и увеличивалась с ростом высоты.

3) В оптимальных условиях генерации волновых возмущений относительная амплитуда возмущений концентрации электронов δN над г. Харьков достигала значений 1÷10 % на высотах порядка 200 км.

4) Параметры волновых возмущений (в первую очередь, их скорость распространения) существенно зависели от близости периода волн к периодам колебаний атмосферы на собственных частотах (периодам акустической отсечки и Брента–Вяйсяля).

5) По своим характеристикам регистрируемые волновые возмущения с периодами 10÷60 мин отвечают внутренним гравитационным волнам.

Хорошо известно (см., например, работы [53–55]), что внутренние гравитационные волны естественного происхождения благодаря созданию дополнительных градиентов концентрации плазмы или из-за иных причин вызывают развитие ионосферных неоднородностей с масштабами от

сотен метров до десятков километров, которые оказывают сильное влияние на свойства ионосферной турбулентности и распространение радиоволн различных частотных диапазонов. В работах [53, 54] были предложены механизмы стимуляции генерации крупномасштабных неоднородностей и появления F -рассеяния при прохождении внутренних гравитационных волн.

Как было показано выше, искусственные волновые возмущения при периодическом нагреве ионосферной плазмы мощными короткими радиоволнами в оптимальных условиях их возбуждения имеют амплитуду, сравнимую с естественными внутренними гравитационными волнами умеренной интенсивности. Это позволяет предполагать, что влияние модификации ионосферы, которая, как правило, осуществляется в режиме несколько минут — излучение, несколько минут — пауза, может обнаруживаться на расстояниях до нескольких тысяч километров от нагревного стенда. Последнее необходимо учитывать при рассмотрении некоторых свойств искусственных неоднородностей и их влияния на распространение радиоволн различных частотных диапазонов. Так, в работе [56] сообщается, что при приёме сигналов спутников GLONASS на приёмных станциях в районе г. Москва во время работы стенда «Сура» наблюдались или сильное уменьшение их интенсивности, или появление быстрых флуктуаций их амплитуды, или появление флуктуаций электронной концентрации с периодом $5\div 10$ мин. Возможно, это связано с прохождением внутренних гравитационных волн, индуцированных работой стенда «Сура», и генерацией неоднородностей концентрации плазмы под их воздействием. В этом направлении выполнены только первые эксперименты. Их продолжение и накопление экспериментальных данных, несомненно, позволит дать более аргументированное заключение о роли возбуждаемых нагревом ионосферы внутренних гравитационных волн в генерации ионосферной турбулентности на больших расстояниях от стенда «Сура».

2. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Представленные в данной работе результаты экспериментальных исследований однозначно демонстрируют, что при модификации ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации крупномасштабные искусственные неоднородности (с размерами $l_{\perp}$ порядка нескольких километров) наиболее эффективно генерируются в области «магнитного зенита» для волны накачки, где также наблюдается наиболее интенсивное возбуждение мелкомасштабных и среднемасштабных искусственных неоднородностей, сильное увеличение температуры электронов, генерация интенсивной высокочастотной турбулентности и ускорение электронов до сверхтепловых энергий. Принимая во внимание, что при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации интенсивность этих неоднородностей оказывается на порядок ниже, чем при воздействии волнами О-поляризации, следует заключить, что в случае использования мощных радиоволн О-поляризации эффекты их резонансного взаимодействия с плазмой, приводящие к сильному её разогреву и турбулизации, должны играть существенную роль.

Приведённые в работе экспериментальные данные свидетельствуют о том, что крупномасштабные искусственные неоднородности обнаруживаются во внешней ионосфере (по крайней мере, до высот около 660 км) в дактах с избыточной концентрацией плазмы, которые формируются при модификации F_2 -области ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации. Это приводит к тому, что для лучей приёмник—спутник, которые по своему направлению могут быть близки к направлению силовых линий геомагнитного поля, на вариации ПЭС будут оказывать сильное влияние не только крупномасштабные неоднородности, возбуждаемые в центральной части возмущённой области, но и вариации плотности плазмы, связанные как с самими дактами, так и с присутствующими в них неоднородностями. Результаты таких экспериментов подробно рассматриваются в работе [57].

Отметим также обнаруженный в работе [35] эффект края диаграммы направленности, когда на краю пучка мощных радиоволн имеет место усиление генерации крупномасштабных неоднородностей. Причина этого эффекта связана с более быстрым изменением интенсивности электрического поля мощной радиоволны в поперечном к оси пучка направлении, а следовательно, и с сильно неоднородным нагревом плазмы в этом направлении, что приводит к генерации соленидальных токов, опоясывающих пучок мощных радиоволн, и через них — к генерации крупномасштабных неоднородностей.

Под влиянием перемещающихся ионосферных возмущений, индуцируемых при периодической модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами, неоднородности концентрации плазмы могут также возбуждаться на ионосферных высотах на расстояниях тысячи и более километров от станда. Всё это показывает, в каких огромных объёмах ионосферы при её модификации мощными короткими радиоволнами могут генерироваться крупномасштабные неоднородности, влияющие на распространение радиоволн различных частотных диапазонов. Необходимо подчеркнуть, что сам факт возбуждения внутренних гравитационных волн при периодической модификации ионосферы мощными радиоволнами свидетельствует о том, что, помимо нагрева ионизированной компоненты, при этом происходит возмущение и нейтральной компоненты атмосферы на ионосферных высотах.

Также в работе было отмечено, что в случае крупномасштабных неоднородностей их перенос в результате горизонтального дрейфа плазмы может существенно влиять на результаты измерений при просвечивании возмущённой области ионосферы сигналами спутников навигационных систем GPS/GLONASS, что необходимо учитывать при интерпретации результатов проводимых экспериментов.

При анализе полученных экспериментальных данных было показано, что после окончания импульса волны накачки с длительностью 6 мин время релаксации концентрации в полости с дефицитом плотности плазмы составляет около 3 минут. Такое короткое время релаксации можно объяснить механизмом униполярной диффузии, когда электроны уходят вдоль силовых линий геомагнитного поля, а ионы — поперёк с возбуждением токов в фоновой плазме. Однако это не соответствует результатам многочисленных измерений времени релаксации столь крупных плазменных образований, которое обычно составляет 10–20 мин. Связано ли это в нашем случае с коротким временем нагрева, которое недостаточно для установления стационарного уровня искусственной ионосферной турбулентности, ещё предстоит выяснить. Здесь можно указать, что для мелкомасштабных неоднородностей эффект зависимости времени их релаксации от длительности излучения волны накачки хорошо известен (см., например, работы [18, 22]).

Авторы выражают благодарность сотрудникам станда «Сура» за оказанную помощь в проведении экспериментальных исследований. Обработка и анализ полученных экспериментальных данных выполнены при поддержке РНФ (проект 14–12–00556). Эксперименты были выполнены в 2008–2013 годах при финансовой поддержке ФЦП «Геофизика» и РФФИ (проекты 08–02–00171, 11–02–00374, 12–02–31839, 12–05–33065, 13–05–01122, 13–05–00511, 13–02–12074 и 13–02–12241).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шлюгер И. С. // Успехи физ. наук. 1974. Т. 113, № 4. С. 729.
2. Гетманцев Г. Г., Комраков Г. П., Коробков Ю. С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18, № 10. С. 621.
3. Gordon W. E., Showen R. L., Carlson H. C. // J. Geophys. Res. 1971. V. 76, No. 31. P. 7808.
4. Carroll J. C., Violette E. J., Utlaut W. F. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 889.

5. Stubbe P., Kopka H., Lauche H., et al. // J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44, No. 12. P. 1 025.
6. Васьков В. В., Гуревич А. В. // ЖЭТФ. 1975. Т. 69, № 1. С. 176.
7. Грач С. М., Караштин А. Н., Митяков Н. А. и др. // Физика плазмы. 1978. Т. 4, № 6. С. 1 321.
8. Das A. C., Fejer J. A. // J. Geophys. Res. 1979. V. A 84, No. 11. P. 6 701.
9. Гуревич А. В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1 145.
10. Литвак А. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11, № 9. С. 1 433.
11. Васьков В. В., Гуревич А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 9. С. 1 261.
12. Ерухимов Л. М., Метелев С. А., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
13. Бойко Г. Н., Васьков В. В., Голян С. Ф. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 8. С. 960.
14. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн. М.: Наука, 1973. 272 с.
15. Иванов В. А., Игнатьев Ю. А., Фролов В. А. и др. // Геомагнетизм и аэрномия. 1986. Т. 26, № 2. С. 328.
16. Грач С. М., Митяков Н. А., Шварц М. М. // Геомагнетизм и аэрномия. 1989. Т. 29, № 4. С. 590.
17. Димант Я. С. Тепловые и стрикционные возмущения плотности ионосферной плазмы в области резонанса мощной радиоволны. В кн: Взаимодействие высокочастотных волн с ионосферой. М.: ИЗМИР АН СССР, 1989. С. 19.
18. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Metelev S. A., Sergeev E. N. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59, No. 18. P. 2 317.
19. Frolov V. L. // Intern. J. Geomagnetism and Aeronomy. 2003. V. 4, No. 2. P. 159.
20. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // УФН. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
21. Беликович В. В., Грач С. М., Караштин А. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545.
22. Фролов В. Л. Искусственная плазменная турбулентность верхней ионосферы, возбуждаемая мощным КВ-радиоизлучением наземных передатчиков. Результаты экспериментальных исследований: Дис. ... докт. ф.-м. н. Н. Новгород, 1996. 419 с.
23. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Куницын В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 7. С. 421.
24. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L., et al. // Radio Sci. 2012. V. 47. Art. no. RS0L15.
25. Gurevich A. V., Zybin K. P., Carlson H. C., Pedersen T. // Phys. Lett. A 305. 2002. P. 264.
26. Фролов В. Л., Сергеев Е. Н., Штуббе П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 2. С. 121.
27. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Недзвецкий Д. И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 8. С. 643.
28. Егоров С. В., Костров А. В., Тронин А. В. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47, № 2. С. 86.
29. Курина Л. Е. // Физика плазмы. 1998. Т. 24, № 10. С. 937.
30. Бенедиктов Е. А., Гончаров Н. П., Игнатьев Ю. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27, № 1. С. 12.
31. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19, № 12. С. 1 902.
32. Фролов В. Л., Митяков Н. А., Шорохова Е. А., Парро М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 6. С. 361.
33. Алимов В. А., Выборнов Ф. И., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 9. С. 679.
34. Терещенко Е. Д., Миличенко А. Н., Фролов В. Л., Юрик Р. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика.

2008. Т. 51, № 11. С. 934.
35. Фролов В. Л., Болотин И. А., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 6. С. 437.
36. Зюзин В. А., Комраков Г. П., Насыров А. М., Стрекалов В. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31, № 5. С. 622.
37. Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 669.
38. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, No. A4. Art. no. 1141.
39. Gurevich A., Carlson H., Kelley M., et al. // Phys. Lett. A 251. 1999. P. 311.
40. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Gurevich A. V., et al. // Phys. Lett. A 325. 2004. P. 381.
41. Petersen T. R., McCarrick M., Gerken T., et al. // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, No. 4. P. 1169.
42. Kuo S., Cheng W.-T., Snyder A., et al. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. Art. no. L01101.
43. Papadopoulos K., Chang C. L., Labenski J., Wallace T. // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38, L20107.
44. Котик Д. С., Рябов А. В., Ермакова Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 6. С. 382.
45. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, № 12. С. 908.
46. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 915.
47. Rapoport V. O., Frolov V. L., Polyakov S. V., et al. // J. Geophys. Res. 2010. V. A115. Art. no. A10322.
48. Frolov V., Rapoport V., Shorokhova E., et al. // 40th COSPAR Scient. Assembly. Moscow, 2–10 August, 2014. Paper C5.1-0017-14.
49. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Шорохова Е. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015 (принята в печать).
50. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 859.
51. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 14.
52. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 307.
53. Гершман Б. Н., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д., Чернобровкина Н. А. Явление F -рассеяния в ионосфере. М.: Наука, 1984. 144 с.
54. Гершман Б. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 12. С. 1571.
55. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск, 2006. 479 с.
56. Chudnovskiy L. S., Golubkov M. G., Frolov V. L., et al. // IV Intern. Conf. "Atmosphere, Ionosphere, Safety" (AIS-2014). Kaliningrad, Russia, June 22–28, 2014. S-5.
57. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Глухов Я. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015 (принята в печать).

Поступила в редакцию 3 декабря 2014 г.; принята в печать 2 апреля 2015 г.

**PECULIARITIES OF EXCITATION OF LARGE-SCALE PLASMA DENSITY
IRREGULARITIES HF-INDUCED BY MODIFICATION
OF THE IONOSPHERIC F_2 REGION**

V. L. Frolov, E. A. Schorokhova, V. E. Kunitsyn, E. S. Andreeva, and A. M. Padokhin

We present experimental results concerning the features of large-scale artificial plasma-density irregularities HF-induced in the ionospheric F_2 region by high-power radio waves. The experiments were performed in recent years using the SURA heating facility. It is shown that at the altitude of the pump-wave reflection, these irregularities are most efficiently generated in the magnetic zenith region. The effect of enhancement of the large-scale irregularity generation at the edge of the pump-wave beam is revealed. The results of studying large-scale irregularities recorded at the altitudes of the outer ionosphere are presented. Experimental results concerning the features of internal gravity waves generated at the ionospheric altitudes during periodic heating of the ionospheric plasma by high-power HF radio waves are summarized and their possible influence on generation of artificial ionospheric irregularities at a long distance from the heater is discussed.