

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ВОЗМУЩЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ,
ИНДУЦИРУЕМЫХ В ИОНОСФЕРЕ ПРИ ЕЕ МОДИФИКАЦИИ
МОЩНЫМИ КВ-РАДИОВОЛНАМИ:
ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**SPATIAL STRUCTURE OF PLASMA DENSITY PERTURBATIONS,
INDUCED IN THE IONOSPHERE MODIFIED BY POWERFUL HF RADIO WAVES:
REVIEW OF EXPERIMENTAL RESULTS**

В.Л. Фролов

*Научно-исследовательский радиофизический институт
Министерства образования и науки,
Нижний Новгород, Россия, frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru
Казанский (Приволжский) федеральный университет
Министерства образования и науки,
Казань, Россия*

V.L. Frolov

*Radiophysical Research Institute, Education and Science
Ministry, N. Novgorod, Russia, frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru
Kazan (Privolzhskii) Federal University, Education and Science
Ministry, Kazan, Russia*

Аннотация. В обзоре анализируются результаты экспериментальных исследований пространственной структуры мелкомасштабных, среднемасштабных и крупномасштабных возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при модификации ее мощными КВ-радиоволнами обыкновенной (О) поляризации. Показано, что по высоте область генерации плазменных возмущений захватывает все тело ионосферы от высот Е-области до высот внешней ионосферы и имеет протяженность до 300–500 км в горизонтальном направлении. Определены особенности генерации искусственных ионосферных неоднородностей различных масштабов в области магнитного зенита. Представлены результаты экспериментов в условиях периодического нагрева ионосферной плазмы, в которых обнаруживается генерация волновых возмущений.

Ключевые слова: ионосфера, мощная радиоволна, нагрев плазмы, плазменная турбулентность.

Abstract. In the review, the results of experimental studies of spatial structure of small-, middle-, and large-scale plasma density perturbations induced in the ionosphere by its pumping by powerful HF O-mode (ordinary) radio waves, are analyzed. It is shown that the region with induced plasma density perturbations occupied all ionosphere body from its E-region up to the topside ionosphere in the height and it has the horizontal length of about of 300–500 km. Peculiarities of generation of artificial ionosphere irregularities of different scale-lengths in the magnetic zenith region are stated. Experimental results obtained under conditions of ionosphere periodical pumping when the generation of travel ionosphere disturbances is revealed are also discussed.

Keywords: ionosphere, powerful radio wave, ionosphere pumping, plasma turbulence.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение особенностей взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферой Земли относится к числу наиболее активно разрабатываемых проблем физики плазмы. Интерес к этой проблеме диктуется разнообразными возможными приложениями, связанными с нагревом плазмы высокочастотным электромагнитным излучением. Здесь принципиальным моментом является то, что взаимодействие интенсивного излучения с плазмой сопровождается развитием целого ряда фундаментальных нелинейных явлений, таких как параметрические неустойчивости плазмы; возбуждение сильной плазменной турбулентности; модификация профиля плотности плазмы под действием сил светового давления, выталкивающего плазму из областей с высокой интенсивностью электрического поля электромагнитной волны; тепловое давление; ускорение электронов до сверхтепловых энергий; генерация вторич-

ного электромагнитного излучения; возбуждение электрических полей и токов в плазме и др. Исследования свойств этих явлений удобно проводить путем создания в ионосфере искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), например с помощью воздействия на нее мощными радиоволнами. При этом измерения выполняются с использованием управляемых источников возмущений, которые индуцируются в ионосфере с известной интенсивностью в течение заданного интервала времени на выбранных высотах в известных геофизических условиях и для диагностики которых используются хорошо развитые различные радиофизические методы исследования ионосферы с размещением измерительных приборов как на Земле, так и на борту космических аппаратов. Важным обстоятельством является то, что модификация ионосферы мощными радиоволнами не вносит загрязнения в окружающую среду, а само воздействие по своей энергетике несопоставимо с намного превосходящей мощ-

ностью природных процессов и не приводит к экологическим последствиям.

Впервые с изменением свойств ионосферы в поле мощных радиоволн столкнулись более 80 лет назад после открытия в 1933 г. Люксембург-Горьковского эффекта [Bailey, 1937; Sciacchitano, 1956]. Среди пионерных здесь следует указать также работы [Виленский, 1953, 1970; Гуревич, 1956; Hibberg, 1956; Bailey, 1959]. Проявление нелинейных эффектов при распространении радиоволн в ионосфере Земли было детально рассмотрено В.Л. Гинзбургом и А.В. Гуревичем [Гинзбург, Гуревич, 1960]; в дальнейшем результаты выполненных в этом направлении исследований были суммированы в работах [Гуревич, Шварцбург, 1973; Gurevich, 1978]. Проведенные исследования стимулировали строительство специализированных мощных радиопередающих устройств (нагревных стендов) модификации ионосферы. Первый стенд начал работу в 1961 г. в НИИ радио (Москва) [Шлюгер, 1974]. Затем были построены стенды в США («Боулдер», 1970 г. [Ютло, Коэн, 1973; Utlaut, 1970; Carroll, et al., 1974] и «Аресибо», 1971 г. [Gordon, et al, 1971]) и в России («Зименки», 1973 г. [Гетманцев и др., 1973; Беликович и др., 1974, 1975]). Позднее вошли в строй стенды около Мурманска («Мончегорск», 1976 г. [Капустин и др., 1977]), в Северной Норвегии (EISCAT-heating, 1980 г. [Stubbe, et al., 1981, 1982; Корка et al., 1982; Robinson, 1989]), около Нижнего Новгорода (СУРА, 1981 г. [Ерухимов и др., 1982]), около Душанбе, Таджикистан («Гиссар», 1981 г. [Ерухимов и др., 1985]), около Харькова, Украина, (1987 г. [Богдан и др., 1980]) и стенд HIPAS (США, 1990 г. [Wagner et al., 1990]). Начиная с 1993 г. эксперименты по модификации ионосферы проводятся на наиболее мощном из построенных сегодня стендов HAARP (Аляска, США) [Gordon, 1997]. С 2004 г. исследования выполняются также в высокоширотной ионосфере на стенде SPEAR (о. Шпицберген, Норвегия) [Wright et al., 2000]. Однако по разным причинам в последние годы нагревные эксперименты активно проводились только на трех стендах: СУРА (средние широты), HAARP и EISCAT-Heating (высокие широты). Сегодня продолжается реконструкция среднеширотного стенда «Аресибо», эксперименты на котором планируется начать в самое ближайшее время.

Уже в первых экспериментах по модификации ионосферы, помимо ожидаемых изменений температуры и концентрации плазмы в масштабе диаграммы направленности (ДН) излучения мощных радиоволн, был обнаружен ряд новых явлений, связанных, в первую очередь, с генерацией искусственных плазменных колебаний и искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН). Выполненные широкомасштабные исследования характеристик и свойств ИИТ, возбуждаемых в ионосфере при воздействии на нее мощными КВ-радиоволнами (см., например, статьи в специальных выпусках журналов [Изв. вузов Радиофизика, 1999, 2005, 2008, 2012; J. Geophys. Res., 1970; Radio Sci., 1974; J. Atmos. Terr. Phys., 1982, 1985, 1997] и обзоры [Ютло, Коэн, 1973; Ерухимов и др., 1987; Stubbe, Hagfors, 1997; Белико-

вич и др., 2007; Гуревич, 2007; Фролов и др., 2007; Leyser, 2001], а также цитируемую в них многочисленную литературу), позволили установить, что, помимо ожидаемого омического нагрева плазмы и самофокусировочной неустойчивости мощной радиоволны, в областях плазменных резонансов вблизи уровня отражения волны накачки (ВН) обыкновенной (О) поляризации развиваются стрикционная и тепловая (резонансная) параметрические неустойчивости. Это приводит, в частности, к возбуждению интенсивных плазменных колебаний, сильному разогреву в этой резонансной области электронов и генерации ИИН с размерами поперек линий геомагнитного поля L_{\perp} от долей метра до десятков километров. Эти ИИН оказывают существенное влияние на свойства распространяющихся через возмущенную область (ВО) ионосферы радиоволн различных диапазонов.

В настоящем обзоре представлены результаты экспериментальных исследований пространственного распределения вариаций плотности плазмы различных масштабов, возбуждаемых при модификации ионосферы мощными КВ-радиоволнами О-поляризации как вблизи высоты их отражения в F2-области ионосферы в пределах ДН излучения в центральной части ВО, где происходит наиболее интенсивная генерация ИИТ и разогрев плазмы, так и далеко от этой области. Основные обсуждаемые в обзоре экспериментальные результаты были получены при модификации среднеширотной ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации, для которых при вертикальном или почти вертикальном их излучении выполняются условия плазменных резонансов вблизи высоты их отражения. Результатом этого является генерация интенсивной ИИТ, намного более интенсивной, чем при модификации ионосферной плазмы мощными радиоволнами необыкновенной (Х) поляризации, которые в силу их дисперсионных свойств не могут испытывать такого резонансного взаимодействия [Гинзбург, 1967]. Там, где в обзоре будут приводиться результаты модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации, это будет отмечено особо. Не будут рассматриваться гирогармонические свойства ИИТ, которые обнаруживаются, когда частота ВН близка одной из гармоник гирочастоты электронов в области взаимодействия мощной радиоволны О-поляризации с ионосферной плазмой. Полученные здесь экспериментальные данные и выполненные теоретические исследования отражают специфические особенности взаимодействия мощного радиоизлучения с магнитоактивной плазмой. Собранный материал обширен, и его анализ выходит за рамки настоящего обзора.

Список используемых в тексте обзора сокращений и обозначений:

- ВО — возмущенная область;
- ВН — волна накачки;
- ВГР — верхний гибридный резонанс;
- ИИТ — искусственная ионосферная турбулентность;
- ИРИ — искусственное радиоизлучение ионосферы;
- ИИН — искусственные ионосферные неоднородности;

МИИН — мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности;

СИИН — среднемасштабные искусственные ионосферные неоднородности;

КИИН — крупномасштабные искусственные ионосферные неоднородности;

ПИВ — перемещающиеся ионосферные возмущения;

ВВ — волновые возмущения;

ВГВ — внутренние гравитационные волны;

ПЭС — полное электронное содержание (или ТЕС — total electron content — в английской литературе);

ТЕСУ — единица ТЕС (ПЭС);

l_{\perp} — масштаб неоднородностей поперек линий геомагнитного поля;

$f_{\text{ВН}}$ — частота волны накачки;

$f_{\text{оF2}}$ — критическая частота F2-слоя ионосферы для О-моды распространения;

$f_{\text{хF2}}$ — критическая частота F2-слоя ионосферы для Х-моды распространения;

$P_{\text{эфф}}$ — эффективная мощность излучения ВН.

1. ВОЗМУЩЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ С РАЗМЕРАМИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫМИ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЧКА МОЩНЫХ РАДИОВОЛН

1.1. Искусственная фокусирующая линза

При взаимодействии мощных КВ-радиоволн с ионосферной плазмой происходит разогрев электронов полем этих волн. При этом на высотах F2-области увеличение температуры электронов T_e приводит к уменьшению их концентрации N_e вследствие диффузионного выталкивания плазмы из нагретой области [Гинзбург, 1967; Гуревич, Шварцбург, 1973; Gurevich, 1978]. Ясно, что горизонтальный размер области с уменьшенной плотностью плазмы будет определяться размерами пучка мощных радиоволн на уровне F2-области (ДН их излучения), а вертикальный размер — свойствами термодиффузионных процессов. Такая область обладает фокусирующими свойствами для распространяющихся через нее радиоволн.

Как показали выполненные в работе [Бенедиктов и др., 1984] измерения, при эффективной мощности излучения ВН $P_{\text{эфф}} = P_0 G \approx 20$ МВт (P_0 — мощность, подводимая к излучающей антенне, G — коэффициент усиления антенны) эта фокусирующая линза имеет размеры 50–100 км в диаметре и до 20–30 км вдоль линий геомагнитного поля, относительное уменьшение плотности плазмы в ней составляет $\delta N = \Delta N / N \approx 5$ –10 %. Ее фокусное расстояние оценивается в ~ 250 км. С ростом мощности ВН уменьшение плотности плазмы нарастает (приблизительно как $P_{\text{эфф}}^{1/2}$). Однако при больших мощностях ВН ($P_{\text{эфф}} \geq 50$ –100 МВт) за счет влияния эффекта дополнительной ионизации плазмы сверхтепловыми электронами, которые ускоряются вплоть до энер-

гий 20–50 эВ в областях с интенсивной плазменной турбулентностью [Gurevich, 1978; Gurevich et al., 1985; Гуревич, 2007], величина δN может либо продолжать расти, но с меньшим темпом, либо даже начать уменьшаться. Так, на стенде НААРР при $P_{\text{эфф}} \approx 440$ МВт ($f_{\text{ВН}} = 2.85$ МГц) обнаруживается генерация дополнительного слоя ионизации, проявляющегося на ионограммах как отдельная структура [Pedersen et al., 2010].

Следует заметить, что развивающиеся вблизи уровня отражения мощной радиоволны интенсивные ИИН за счет эффектов рассеяния и рефракции радиоволн маскируют действие фокусирующей линзы. Только спустя несколько минут после выключения ВН, когда вследствие релаксационных процессов их интенсивность уже значительно уменьшается, а большая по масштабу структура фокусирующей линзы еще сохраняется, фокусировка радиоволн начинает хорошо проявляться [Бенедиктов и др., 1984].

Образование полости с обедненной плотностью плазмы при нагреве F2-области ионосферы в вечерних и ночных условиях легко обнаруживается в экспериментах по зондированию ВО радиосигналами ИСЗ навигационных систем GPS/GLONASS [Терещенко и др., 2008; Фролов и др., 2010; Kunitsyn et al., 2011, 2012]. Такое зондирование позволяет получать данные об областях изменения плотности плазмы при модификации ионосферы, которые имеют размеры от единиц до десятков километров и больше. Можно также изучать характеристики развития километровых неоднородностей в различных частях ВО ионосферы, в частности особенности их генерации в области магнитного зенита для ВН, где на уровне ВГР мощная радиоволна О-поляризации распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля и имеет место ее наиболее сильное взаимодействие с плазмой [Гуревич и др., 2005, Гуревич, 2007]. В этой области, как показали исследования [Rietveld et al., 2003], происходит наиболее интенсивный разогрев плазмы (температура электронов может возрасти в 2–3 раза), сильное (до 20 %) уменьшение плотности плазмы на высотах максимума F2-слоя, возбуждение наиболее сильных мелкомасштабных ИИН, наиболее эффективное ускорение электронов до сверхтепловых энергий, а также значительное увеличение скорости выноса ионов вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля. В среднеширотной ионосфере (для стенда СУРА, для которого наклонение геомагнитного поля составляет 19°), для того чтобы в невозмущенных условиях засветить область магнитного зенита для ВН, ДН излучения пучка мощных радиоволн с учетом их рефракции в ионосфере должна быть наклонена на 12 – 14° на юг от вертикали для $f_{\text{ВН}} \approx 5$ МГц. Однако в условиях сильной возмущенности ионосферы (при развитии интенсивных ИИН, способных каналировать мощные радиоволны) проявление эффекта магнитного зенита в экспериментах на стенде СУРА возможно и при распространении мощной радиоволны вдоль силовых линий геомагнитного поля, как это и предсказывалось в работе [Гуревич и др., 2005, Гуревич, 2007].

В качестве примера на рис. 1 представлены результаты измерений ПЭС при зондировании ВО ионосферы сигналами ИСЗ навигационной системы GPS [Фролов и др., 2015а]. Эти измерения выполнялись 28 августа 2012 г., когда стелс с 20:40 до 22:30 мск излучал волны О-поляризации на частоте 4785 кГц с $P_{\text{эфф}} \approx 100$ МВт в режиме 10 мин — излучение, 10 мин — пауза с наклоном ДН на 12° на юг в область магнитного зенита для ВН. На панелях *б*, *г* периоды работы стелса СУРА отмечены уширенными темными отрезками на оси времени, время на панели *в* дано в минутах с начала регистрации в 16:32 UT. В этом сеансе луч зрения на ИСЗ пересекал ВО с юго-запада на северо-восток, проходя через центр ДН пучка мощных радиоволн (см. панель *а*). Проекция ДН излучения стелса по уровням 0.5 и 0.1 на высоту отражения ВН показаны сплошной и штриховой линиями соответственно. Измерения выполнялись в магнитоспокойных условиях при $\Sigma K_p = 5^+$. Из представленных на панели *г* результатов измерений ПЭС хорошо видно, что имеет место сильное уменьшение его величины (до 1 TECU; 1 TECU = 10^{16} эл/м²), что говорит о формировании полости с уменьшенной концентрацией плазмы в области южного края ДН пучка мощных радиоволн близко к области магнитного зенита. Внутри полости регистрируются быстрые вариации ПЭС длительностью 2–3 мин с амплитудой до 0.3 TECU, более ярко проявляющиеся на значениях ПЭС, из которых удален тренд (см. панель *б*) и в вэйвлет-спектре его вариаций (см. панель *в*). Такое поведение ПЭС характерно для вечерних и ночных часов проведения измерений, когда луч на ИСЗ проходит близко к области магнитного зенита. Небольшие вариации ПЭС до 0.1 TECU наблюдаются как вблизи центральной части ВО (17:35–17:50 UT), так и за юго-западным краем ДН излучения пучка мощных радиоволн (17:10–17:25 UT). С учетом скорости дрейфа плазмы и скорости перемещения луча на ИСЗ по ВО размер l_{\perp} возбуждаемых в области магнитного зенита неоднородностей может составлять от 4 до 9 км при горизонтальном размере самой полости ~50 км. Полагая, что размеры L_{\parallel} полости и неоднородностей вдоль луча на ИСЗ составляют соответственно ~100 км и ~50 км (см., например, [Ерухимов и др., 1987; Фролов, 1996]), по вариациям ПЭС можно оценить величину относительных флуктуаций плотности плазмы δN : для полости и неоднородностей размером $l_{\perp} \approx 7$ км эта величина составляет ~35 и ~25 % соответственно.

Таким образом, представленные здесь результаты измерений ясно демонстрируют, что максимальное уменьшение концентрации плазмы, соответствующее фокусирующей линзе, имеет место в области магнитного зенита. Горизонтальные размеры этой полости с уменьшенной плотностью плазмы составляют ~50 км, и она оказывается заполнена интенсивными ИИН размерами $l_{\perp} \approx 4$ –9 км, чем эта область сильно отличается от остальной части ВО. В целом, полученные здесь результаты хорошо соответствуют данным ранее выполненным измерений [Djuth et al., 2006; Терещенко и др., 2008].

1.2. Пространственная структура ВО ионосферы (по данным спутниковой радиотомографии)

Первые измерения методом спутниковой радиотомографии пространственной структуры ВО ионосферы над стелсом СУРА были выполнены в совместных с группой исследователей из ПГИ КНЦ РАН (Мурманск) экспериментах в августе 2002 г. и повторены в августе 2005 г. [Фролов и др., 2007; Tereshchenko et al., 2004]. Для проведения измерений была развернута цепочка из трех приемных пунктов, расположенных вдоль траектории низкоорбитальных навигационных ИСЗ. Центральный приемный пункт располагался на стелсе СУРА, второй — в ~100 км к югу (район п. Сеченово в 2002 г. и п. Мурзино в 2005 г.), третий — в ~150 км к северу (район п. Арья в 2002 г. и г. Урень в 2005 г.). Для регистрации сигналов на двух когерентных частотах 150 и 400 МГц использовались специальные двухканальные приемники, которые позволяли в автоматическом режиме проводить поиск и регистрацию квадратурных компонент сигнала на частоте 150 МГц и разностную фазу сигнала на частоте 150 МГц относительно опорного сигнала на частоте 400 МГц. Это давало возможность получения одновременно в каждом приемном пункте данных о вариациях амплитуды и фазы сигнала на частоте 150 МГц и изменении ПЭС на луче зрения от спутника до приемного пункта. Стелс СУРА включался за 15–20 мин до пролета ИСЗ над стелсом, чтобы успеть создать развинутую до стационарного уровня ИИТ. Частота ВН выбиралась из условия, чтобы ее значение было немного ниже критической частоты f_oF_2 . Для нагрева ионосферы использовались волны О-поляризации, эксперименты проводились либо с вертикальной ДН, либо ДН была наклонена на 12° на юг, чтобы усилить генерацию ИИТ за счет эффекта магнитного зенита.

На рис. 2 представлены две томограммы, которые были получены 21.08.2005 г. в вечерние (*а*) и 29.08.2002 г. в ночные (*б*) часы наблюдений [Фролов и др., 2007]. В обоих случаях ВН излучалась вертикально и отражалась вблизи максимума F2-слоя ионосферы на высотах 270–300 км. Положение ДН излучения пучка мощных радиоволн показано штриховыми линиями, направление линий геомагнитного поля — сплошной линией. В первом случае частота ВН и эффективная мощность ее излучения составляли 4544 кГц и 100 МВт, во втором — 4300 кГц и 35 МВт. Томограммы представлены в виде разностных реконструкций, показывающих изменение значений плотности плазмы ΔN относительно невозмущенного профиля, взятого по модели IRI с привязкой по критической частоте, измеряемой с помощью расположенного на стелсе СУРА ионозонда вертикального зондирования. Пространственное разрешение вариаций плотности составляет ~20 км.

На томограммах, представленных на рис. 2, хорошо видно, что возмущения плотности плазмы имеют выраженную ориентацию вдоль силовых линий

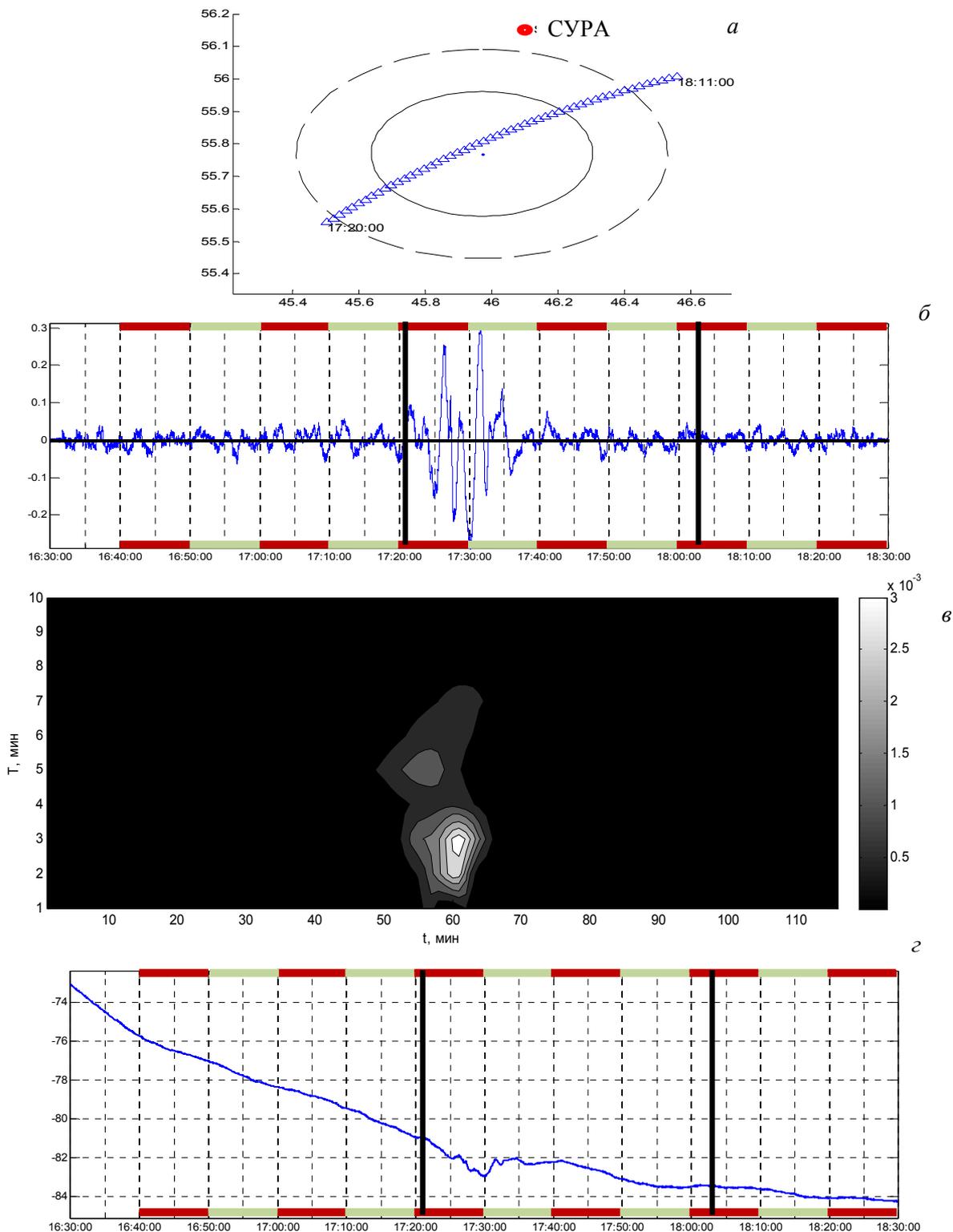


Рис. 1. Результаты измерений ПЭС 28 августа 2012 г., когда модификация ионосферы с 20:40 до 22:30 мск осуществлялась в режиме излучение (10 мин) — пауза (10 мин): *a* — сечение ВО ионосферы лучом на ИСЗ на высоте отражения ВН; *б*, *в* — значения с удаленным трендом и вэйвлет-спектр вариаций ПЭС. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

геомагнитного поля. Они наблюдаются в интервале высот от ~200 до 600–700 км (во всем интервале высот, где было возможно восстановление вариаций плотности плазмы) и регистрируются в более широкой горизонтальной области до ±150 и ±300 км относительно центра пучка мощных радиоволн в ве-

черной и ночной ионосфере соответственно, тогда как область ионосферы, засвеченная главным лепестком ДН антенны стенда, имеет горизонтальные размеры всего 50–70 км. Хорошо видно, что в южном секторе ДН антенны стенда развивается полость, в которой регистрируется сильное (до 20%)

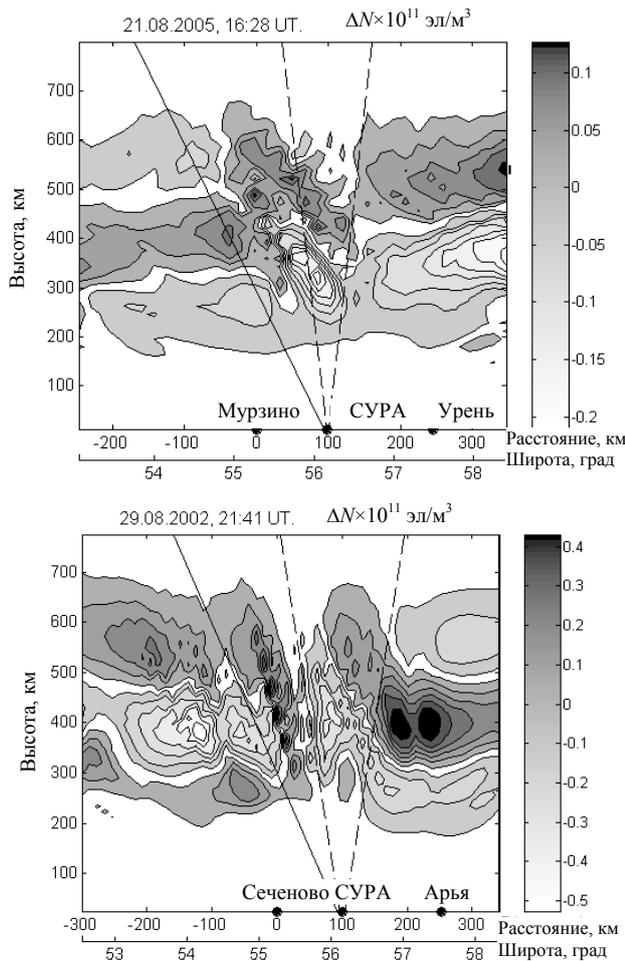


Рис. 2. Примеры радиотомограмм, полученных 21.08.2005 г. в вечерние (а) и 29.08.2002 г. в ночные часы наблюдений (б). Положение ДН излучения пучка мощных радиоволн показано штриховыми линиями, направление линий геомагнитного поля — сплошной линией

уменьшение концентрации плазмы (фокусирующая линза). Размеры полости составляют ~ 50 км в горизонтальном направлении вдоль орбиты ИСЗ и до 150–200 км в направлении силовых линий геомагнитного поля. Можно также заключить, что эта полость окружена областями с повышенной плотностью плазмы, вытянутыми вдоль силовых линий геомагнитного поля и занимающими даже больший высотный интервал, чем сама полость. Следует отметить присутствие в интервале высот от высоты отражения ВН до 500–600 км вытянутых вдоль геомагнитного поля структур с волнообразной формой возмущений плотности плазмы как в области с уменьшенной плотностью плазмы, так и в областях с увеличенной ее концентрацией. Из рис. 2 видно, что такие возмущения сосредоточены в узких силовых трубках геомагнитного поля с поперечными размерами ~ 30 км и имеют характерный масштаб вдоль поля ~ 75 км для вечерней ионосферы и ~ 55 км для ночной. Природа образования таких волнообразных возмущений в настоящее время неясна. Необходимо отметить, что, когда ДН антенны стенда наклонена на 12° на юг в область магнитного зенита для ВН, наиболее сильные возмущения плотности плазмы оказываются сосредоточенными в центре ДН.

Модификация в условиях дневной ионосферы не приводила к образованию областей с таким сильным, как в ночных условиях, обеднением плазмы в F2-области. Возмущения плотности плазмы здесь были много меньше их значений для вечерних и ночных условий модификации ионосферы, и они не имели отмеченных выше тонких структур [Фролов и др., 2007]. В то же время в дневной ионосфере имеет место значительное увеличение плотности плазмы на высотах 130–180 км, о котором речь пойдет в следующем разделе обзора.

С 2007 г. радиотомографические исследования пространственной структуры ВО ионосферы на стенде СУРА проводятся совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва) [Kunitsyn et al., 2011, 2012]. Для этого вдоль орбиты низкоорбитальных ИСЗ разворачивается цепочка из трех приемников: один — на стенде СУРА, второй — в 50 км севернее стенда (п. Галибиха) и третий — в 100 км южнее стенда (п. Сеченово). Особенностью этих экспериментов является то, что в них модификация ионосферы в течение 15–20 мин во время пролета ИСЗ над стендом предварялась, как правило, периодическим воздействием на ионосферу в режиме 10–15 мин — излучение, 10–15 мин — пауза в течение 2–2.5 ч. Такое периодическое излучение ВН позволяет возбуждать в ионосфере Земли ВВ, которые хорошо регистрируются на томограммах. Их характеристики будут представлены в шестом разделе обзора.

На рис. 3 приведена построенная в изолиниях томограмма, которая была получена 18.08.2011 г. в условиях ночной ионосферы [Kunitsyn et al., 2012]. На ней хорошо видно существование полости с пониженной плотностью плазмы в интервале высот от ~ 200 –450 км (здесь изолинии, соответствующие более низкой плотности плазмы, пронизывают максимум F2-слоя ионосферы). Кроме того, на томограмме видны отрицательные возмущения плотности плазмы на высотах ниже высоты отражения ВН (изолинии, соответствующие меньшей плотности плазмы, поднимаются вверх в более плотную плазму), дакт с избыточной плотностью плазмы на высотах внешней ионосферы (здесь в области дакта изолинии с большей плотностью плазмы смещены в менее плотную плазму) и ВВ на ионосферных высотах, расходящиеся от области ионосферы, засвеченной пучком мощных радиоволн. Ниже свойства всех этих индуцированных нагревом ионосферы возмущений будут рассмотрены более подробно.

1.3. Искусственная дефокусирующая линза

При нагреве мощной КВ-радиоволной ионосферной плазмы на высотах 130–180 км из-за нарушения ионизационно-рекомбинационного баланса с увеличением температуры электронов T_e наблюдается рост электронной концентрации N_e [Гуревич, Шварцбург, 1973]. Это приводит к формированию на этих высотах области с повышенной плотностью плазмы, которая играет роль дефокусирующей линзы. Ясно, что ее формирование возможно, когда на высотах 130–180 км имеется достаточно высокий уровень концентрации плазмы (когда днем в ионосфере присутствуют выраженные ионосферные E- и F1-слои).

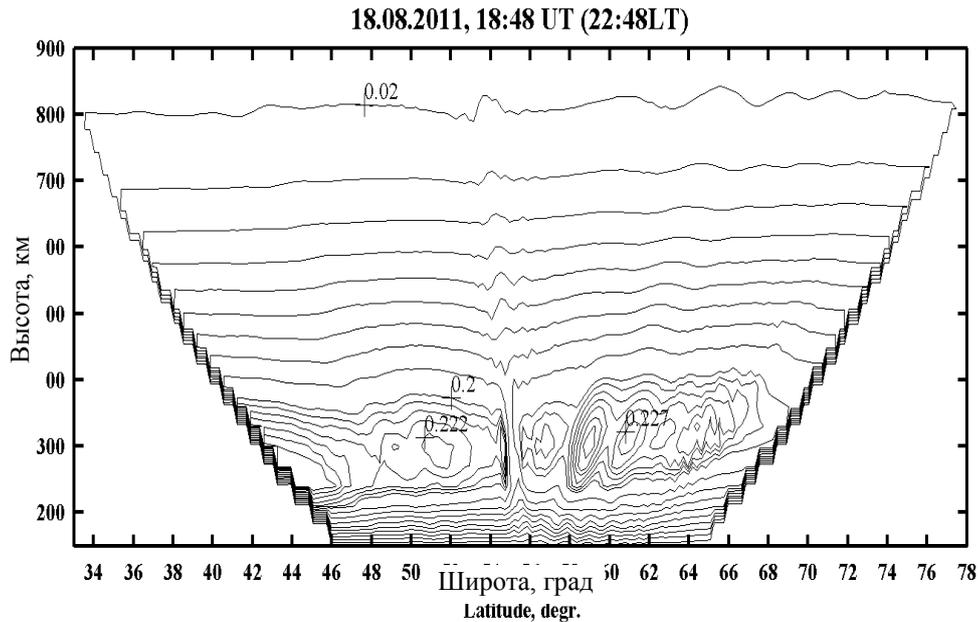


Рис. 3. Пример радиотомограммы, полученной 18.08.2011 г. в условиях ночной ионосферы. Томограмма построена для большой области широт 34–78° N и представлена в изолиниях

Как показали эксперименты [Бойко и др., 1984, 1985], такая линза образуется при модификации дневной ионосферы волнами как О-, так и Х-поляризации. При мощностях ВН $P_{эфф} \approx 100$ МВт величина δN может достигать в линзе 10–20 %, фокусное расстояние такой линзы равно 50–70 км. При этом ослабление интенсивности мощной радиоволны за счет дефокусировки может достигать 10–20 дБ на уровне ее отражения в F2-слое ионосферы. Характерные времена образования и релаксации дефокусирующей линзы составляют 15–20 с. Все полученные в эксперименте параметры дефокусирующей линзы хорошо соответствуют их расчетным значениям, полученным в рамках нелинейной теории распространения мощных радиоволн в ионосферной плазме [Гуревич, Шварцбург, 1973; Gurevich, 1978]. Влияние области с повышенной плотностью плазмы хорошо прослеживается в измерениях ПЭС при зондировании ВО в условиях дневной ионосферы сигналами ИСЗ навигационных систем GPS/GLONASS [Фролов и др., 2010].

Совместное влияние более высокого уровня поглощения радиоволн в нижней ионосфере (в ее D- и E-слоях) и дефокусировки радиоволн на дефокусирующей линзе приводит к тому, что в условиях дневной ионосферы интенсивность потока излучения мощной радиоволны на уровне F2-области может быть ослаблена более чем на 20 дБ по сравнению со случаем распространения ВН в свободном пространстве. Кроме того, дневная ионосфера характеризуется более высокой концентрацией фотоэлектронов (это приводит к более сильному затуханию плазменных волн), более низкой высотой максимума F2-слоя и более высокой в нем концентрацией нейтралов. Все это также уменьшает эффективность взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой [Гинзбург, Гуревич, 1960; Гуревич, Шварцбург, 1973; Gurevich, 1978]. Поэтому

регистрируемая ИИТ во всех экспериментах имеет гораздо более слабую интенсивность в дневных условиях модификации ионосферы по сравнению с нагревом плазмы в вечерних и ночных условиях.

1.4. Деформация профиля плотности плазмы в области возбуждения интенсивной плазменной турбулентности

При воздействии мощной радиоволны О-поляризации на плазму F2-области ионосферы вследствие развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости в области ВГР возбуждаются интенсивные плазменные волны и МИИИ с $l_{\perp} \leq 30\text{--}50$ м [Ерухимов и др., 1987; Гуревич, 2007; Gurevich, 1978]. При этом плазменные волны локализованы в узкой области высот, где появляются сильные высокочастотные электрические поля, давление которых приводит к стрикционному вытеснению плазмы из области сильного поля и к искажению профиля электронной концентрации. Эти волны приводят также к сильному разогреву плазмы и тепловому ее выдавливанию из области сильного разогрева. Эти эффекты исследовались экспериментально в работах [Васьков и др., 1986; Березин и др., 1991] и теоретически в работах [Васьков, Димант, 1989; Грач и др., 1989], где было показано, что при мощностях ВН $P_{эфф} \geq 10$ МВт деформация профиля плотности приводит к образованию ступеньки плотности плазмы — постоянной плотности плазмы на некотором интервале высот выше высоты ВГР. Это изменяет условие взаимодействия мощной радиоволны с плазмой, влияя тем самым на свойства высокочастотной плазменной турбулентности и ИИТ в целом. Горизонтальная неоднородность скачка плотности формирует также фокусирующий в сторону земной поверхности «плазменный рефлектор» для радиоволн,

отражающихся в окрестности возмущенной зоны. Его образование связано с тем, что в малой окрестности ВГР в течение нескольких секунд после включения ВН происходит локальное уменьшение плотности плазмы. Поскольку величина возмущения концентрации возрастает с ростом интенсивности ВН, неоднородное возмущение ΔN по ДН антенны нагревного стенда приводит к неодинаковой деформации профиля (профиль больше продавливается в центре ДН) или к образованию плазменного рефлектора. Его фокусирующее влияние определяет увеличение в 1.5–2 раза амплитуды принимаемых на Земле сигналов пробных волн, отражающихся вблизи уровня ВГР. Проявление такого плазменного рефлектора в экспериментах по зондированию ВО ионосферы пробными радиоволнами обсуждается в работах [Васьков и др., 1986; Фролов, 1996]. Естественно, с развитием интенсивных ИИН действие такого рефлектора практически полностью подавляется, поэтому его влияние обнаруживается только в первые секунды модификации ионосферы.

В заключение дополнительно отметим, что сигналы падающей и отраженной мощных радиоволн образуют стоячую волну, в поле которой из-за стрикционных или тепловых эффектов происходит изменение плотности плазмы по высоте и образование искусственных периодических неоднородностей (ИПН) ее концентрации. Механизмы образования ИПН и возможности их использования для диагностики ионосферной плазмы детально исследовались в работе [Беликович и др., 1999]. Ясно, что сильные ИИН, образующиеся при модификации ионосферы мощной радиоволной О-поляризации, приводят к быстрому разрушению такой периодической структуры. Поэтому для ее создания обычно используются волны Х-поляризации, поскольку интенсивность ИИН в этом случае оказывается значительно слабее, а время развития неоднородностей увеличивается.

2. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ВОЗМУЩЕННОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИИН

2.1. Распределение МИИН по ВО ионосферы

К МИИН мы будем относить неоднородности с $l_{\perp} \approx 1-50$ м, которые возбуждаются при развитии тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости и вызывают появление эффекта аномального ослабления мощной радиоволны О-поляризации и пробных радиоволн (ПВ) О-поляризации, зондирующих ВО ионосферы на частотах $f_{ПВ} \approx f_{ВН}$ [Ютло, Коэн, 1973; Беликович и др., 1974, 1975; Ерухимов и др., 1987; Фролов, 1996; Гуревич, 2007; Фролов и др., 2007; Gurevich, 1978].

Уже первые эксперименты по определению углов прихода рассеянных на МИИН сигналов [Коровин и др., 1981; Насыров, 1991] показали, что во время модификации ионосферы даже на стационарной стадии развития ИИТ наблюдается изменение

положения («блуждание») эффективного центра рассеяния в горизонтальной плоскости в пределах ~ 20 км. Такое блуждание связывается с неоднородной структурой распределения МИИН (в данном случае неоднородностей с $l_{\perp} \approx 3.3$ м) по ВО и с появлением нескольких ядер рассеяния с повышенной интенсивностью неоднородностей. При этом следует полагать, что интенсивность неоднородностей в таких ядрах также испытывает значительные вариации во времени, более сильные на начальной стадии развития неоднородностей. На существование в ВО ионосферы нескольких центров рассеяния указывалось и в работе [Алебастров и др., 1984].

Исследование рассеивающих свойств ВО (распределения МИИН по ВО) на основе радиолокационного зондирования импульсными сигналами на частоте 170 МГц (рассеяние на неоднородностях с $l_{\perp} \approx 0.9$ м) было выполнено в работе [Авдеев и др., 1989]. Эти измерения показали, что принимаемый сигнал является суммой сигналов от многих центров рассеяния, размеры которых составляют 2.5–6 км. Было получено также, что северный край области рассеяния резко очерчен (интенсивность рассеяния резко уменьшается с уходом на север), в то время как на южном крае наблюдается более плавное спадание интенсивности рассеянного сигнала. В работе [Авдеев и др., 1989] это связывается с зависимостью генерации тепловой параметрической неустойчивости от угла между направлением геомагнитного поля и волнового вектора мощной радиоволны [Митяков и др., 1975].

В последние годы с введением в эксплуатацию в Южном федеральном университете (Ростов-на-Дону) КВ-ионозонда-пеленгатора, позволяющего проводить спектральные и угловые измерения рассеянных на ИИН сигналов, появились новые возможности исследования пространственной структуры ВО для декаметровых ИИН. Уже первые выполненные здесь эксперименты [Урядов и др., 2008] показали, что ВО часто имеет пэччевую структуру, когда помимо центральной части ВО, определяемой положением ДН излучения пучка мощных радиоволн, могут обнаруживаться еще несколько центров рассеяния (областей с интенсивными декаметровыми МИИН), которые имеют горизонтальные размеры до нескольких десятков километров и разнесены на расстояние до 100 км и более. Можно предположить, что формирование таких удаленных от центральной части ВО локальных областей с интенсивными декаметровыми ИИН определяется как состоянием ионосферной плазмы (уровнем ее возмущенности), так и характером распространения в ней КВ-радиоволн, когда в отдельных областях ионосферы возможно образование зон фокусировки потока мощного радиоизлучения. Неоднородная (кластерная) структура ВО ионосферы была позднее подтверждена измерениями [Вертоградов и др., 2012].

Среди других результатов исследований укажем на работу [Hussel, et al., 1996], в которой было показано, что область ионосферы, занятая декаметровыми неоднородностями, в ряде случаев имеет слоистую структуру со значительным ослаблением интенсивности неоднородностей в межслоевом пространстве.

Такая структура ВО прямо противоречит часто привлекаемому для анализа полученных экспериментальных данных механизму «прорастания» неоднородностей концентрации плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля вверх и вниз по высоте от области их генерации вблизи высоты отражения ВН, где имеет место наиболее интенсивное развитие ИИТ за счет резонансного взаимодействия мощной радиоволны О-поляризации с магнитоактивной плазмой (верхней ионосферой).

2.2. Генерация МИИН на стрикционной фазе взаимодействия ВН с плазмой

Как было продемонстрировано в работах [Бойко и др., 1990; Фролов, 1996], генерация МИИН вблизи высоты отражения ВН наблюдается уже на стрикционных временах взаимодействия мощной радиоволны О-поляризации с плазмой F2-области ионосферы, т. е. для $t \leq 0.5$ с после включения ВН еще до начала развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости. С учетом характерных времен развития и релаксации этих стрикционных неоднородностей, они имеют характерный масштаб $l_{\perp} \leq 3$ м, а их интенсивность, исходя из величины эффекта, должна составлять $\delta N \approx (1-5) \cdot 10^{-3}$, что сравнимо с интенсивностью неоднородностей тепловой природы. В качестве механизма генерации мелкомасштабных стрикционных неоднородностей ионосферной плазмы, возбуждаемых мощной радиоволной О-поляризации вблизи высоты ее отражения, рассматривается тепловая самофокусирующая неустойчивость плазменных волн [Васьков и др., 1981б], в которой учитывается совместное влияние тепловых и стрикционных эффектов на развитие неоднородностей. Эти неоднородности, вытягиваясь вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля, могут достигать уровня ВГР, где они служат в качестве «затравочных» неоднородностей для развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости, что и приводит к более быстрому их развитию и генерации МИИН тепловой природы. Ясно, что присутствие естественных крупномасштабных неоднородностей концентрации плазмы (особенно в вечерней и ночной ионосфере), а также остаточный уровень КИИН после окончания предыдущих циклов модификации ионосферы будут приводить к вариациям интенсивности мощной радиоволны на уровне ее отражения. Это вызовет неоднородное развитие стрикционной параметрической неустойчивости по ВО ионосферы и неоднородную по пространству генерацию стрикционных МИИН, а следовательно, и неравномерную по пространству генерацию неоднородностей тепловой природы.

2.3. Особенности возбуждения МИИН при воздействии на ионосферу наклонным пучком мощных радиоволн

Уже в первых экспериментах по модификации ионосферы мощным КВ-радиоизлучением, выполненных в 1970–1973 гг. на нагревном стенде «Боулдер» (Колорадо, США), было установлено, что величина аномального ослабления пробных радио-

волн, зондирующих ВО ионосферы, сильно зависит от угла их прихода и имеет ярко выраженный максимум в области магнитного зенита [Allen et al., 1974]. Наиболее разумной интерпретацией этих результатов было предположение об усиленной генерации МИИН в той части ВО ионосферы, где пучок мощных радиоволн распространяется в направлении, близком направлению геомагнитного поля. Позднее это нашло свое подтверждение во многих экспериментах по ракурсному рассеянию радиоволн КВ- и УКВ-диапазона. Было установлено, что интенсивность МИИН существенно больше на южном крае ВО [Авдеев и др., 1989; Minkoff, Kreppel, 1976], а во время модификации ионосферы наблюдается смещение центрального пятна рассеяния на юг на расстояние 50–80 км [Беленов и др., 1977; Коровин и др., 1981]. Заметим, что все эти эксперименты выполнялись при вертикальных ДН излучения мощной радиоволны, которые имели ширину 15–20°.

Прямым доказательством предположения о выделенности области магнитного зенита в генерации МИИН явились выполненные на стенде СУРА эксперименты по изучению зависимости интенсивности ракурсного рассеяния на неоднородностях $l_{\perp} \approx 3.3$ м от угла наклона ДН излучения мощных радиоволн [Зюзин и др., 1988; Насыров, 1991]. В этих экспериментах наклон луча осуществлялся в плоскости геомагнитного меридиана в пределах $\pm 32^\circ$ от вертикали. Измерения выполнялись в течение 1983–1985 гг. в вечерние часы. Параллельно проводились измерения величины эффекта самовоздействия мощной радиоволны и величины аномального ослабления пробных радиоволн на частотах, близких частоте ВН. Выполненные исследования продемонстрировали наличие выделенного максимума интенсивности рассеяния на углах наклона луча 12–16° на юг. Относительно вертикального направления излучения ВН увеличение интенсивности рассеянного сигнала составляло ~4 дБ. При дальнейшем увеличении угла наклона к югу интенсивность рассеяния резко уменьшалась: для углов ~24° — более чем на 15 дБ относительно своего максимального значения. При отклонении луча к северу от вертикали имело место плавное уменьшение интенсивности рассеяния. При углах наклона ДН ~16° на юг в этих измерениях наблюдался также максимум величин самовоздействия ВН и аномального ослабления пробных радиоволн. Кроме того, в работе [Фролов и др., 2005] было установлено, что при углах наклона пучка мощных радиоволн на 8–12° на юг наблюдался максимум интенсивности излучения тепловых компонент искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ), свойства которого в значительной степени определяются развитием МИИН. Позднее в работе [Урядов и др., 2007] были проведены исследования зависимости интенсивности ракурсного рассеяния на декаметровых неоднородностях от наклона ДН излучения мощной радиоволны в диапазоне углов 6–28° к югу от вертикали. Было получено, что максимальная интенсивность рассеяния на МИИН с $l_{\perp} \approx 10-15$ м имела место при углах ~12° к югу от вертикали, достаточно резко уменьшаясь при дальнейшем увеличении угла наклона на юг. Напомним, что для стенда СУРА угол между направлением геомагнитного поля и вертикалью составляет ~19°.

Таким образом, все выполненные на среднеширотном стенде СУРА исследования однозначно показывают, что при $f_{\text{ВН}} \approx 5$ МГц наблюдается максимальная интенсивность генерации метровых и декаметровых неоднородностей при углах наклона мощной радиоволны $\sim 12^\circ$ на юг от вертикали. На самом деле при выбранной ориентации пучка мощных радиоволн истинный угол наклона составляет $\sim 14^\circ$ на юг от вертикали из-за имеющего место небольшого наклона на юг площадки, на которой расположена антенная решетка стенда СУРА.

Теоретические аспекты полученной зависимости интенсивности мелкомасштабного расслоения плазмы вблизи уровня отражения мощной радиоволны О-поляризации от угла ее наклона исследовались в работах [Будько и др., 1989; Насыров, 1991]. На основе выполненных траекторных расчетов для условий невозмущенной ионосферы было показано, что резкое уменьшение интенсивности МИИН при углах наклона больше 16° на юг связано с уменьшением высоты отражения ВН ниже уровня ВГР. В условиях невозмущенной ионосферы для $f_{\text{ВН}} \approx 5$ МГц при углах наклона ДН излучения $\sim 12^\circ$ мощные радиоволны на высоте ВГР за счет рефракции будут распространяться вдоль силовых линий геомагнитного поля (эффект магнитного зенита для ВН), что обеспечивает высокую эффективность их взаимодействия с плазмой. Уменьшение интенсивности МИИН при северных наклонах определяется главным образом нарушением условия квазипродольности распространения ВН и связанным с этим уменьшением эффективности возбуждения тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости [Митяков и др., 1975].

В последние годы в работах [Гуревич и др., 2005; Гуревич, 2007; Gurevich et al., 2002a, 2002b] была развита теория нелинейного структурирования плазмы и эффекта магнитного зенита. Толчком к этому послужили эксперименты [Kelley et al., 1995], в которых на основе ракетных измерений вариаций плотности плазмы в ВО ионосферы было показано, что в искусственных декаметровых неоднородностях плотность плазмы меньше, чем в окружающей среде, и сосредоточены они в локальных областях с размерами поперек геомагнитного поля порядка нескольких километров. Следует отметить, что еще в работе [Выборнов и др., 1986] на основе анализа спектра флуктуаций фазы и амплитуды сигналов ИСЗ, прошедших через ВО среднеширотной ионосферы, было сделано предположение, что МИИН должны быть сосредоточены в неоднородностях размерами $l_{\perp} \approx 1$ км. Такие крупномасштабные структуры имеют в среднем пониженную плотность плазмы и, следовательно, вызывают фокусировку распространяющегося вдоль геомагнитного поля электромагнитного излучения. Это приводит к еще более сильной генерации МИИН, более сильному разогреву плазмы, уменьшению плотности плазмы в этих крупномасштабных неоднородностях и т. д. Согласно развитой теории, наиболее сильные возмущения ионосферной плазмы (температуры электронов, интенсивности МИИН, интенсивности

плазменных колебаний, интенсивности искусственного оптического свечения и др.) наблюдаются, когда мощная радиоволна О-поляризации в области своего взаимодействия с плазмой распространяется вдоль геомагнитного поля в искусственно созданном ею канале. Здесь эффект магнитного зенита — это результат совместного действия нелинейной самофокусировки мощной радиоволны, сильного нелинейного процесса структурирования плазмы, аномально высокого нагрева электронов и генерации вытянутых вдоль магнитного поля интенсивных неоднородностей с пониженной плотностью плазмы. При этом в северных широтах (для стендов EISCAT-Heating и HAARP), где угол наклона геомагнитного поля больше, чем в средних, эффект магнитного зенита проявляется, когда ВН излучается прямо вдоль силовых линий геомагнитного поля. На средних широтах эффект магнитного зенита наблюдается при углах излучения ВН, меньших, чем угол между геомагнитным полем и вертикалью. При этом рефракция и нелинейная самофокусировка «доворачивают» луч до направления вдоль геомагнитного поля в области взаимодействия ВН с плазмой. Однако с развитием ИИТ и появлением вытянутых вдоль геомагнитного поля интенсивных ИИН километровых масштабов, которые способны каналировать мощные радиоволны, возникает ситуация, когда волна может достичь области ВГР, даже если она прямо с поверхности Земли направляется вдоль линий геомагнитного поля. Это объясняет отмеченное выше постепенное смещение центра области рассеяния на юг во время модификации ионосферы.

Результаты выполненных всесторонних исследований свойств МИИН, возбуждаемых в вечерней или ночной F2-области ионосферы вблизи высоты отражения мощного радиоизлучения О-поляризации, позволили построить эмпирическую модель эволюции спектральной интенсивности флуктуаций плотности плазмы $\Phi_N(\mathbf{k})$ в мелкомасштабной ($l_{\perp} < 30$ м) части спектра на различных стадиях развития неоднородностей [Frolov et al., 1997].

3. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ВОЗМУЩЕННОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ ИИН

3.1. Результаты исследований характеристик среднемасштабных ИИН, возбуждаемых на высотах отражения ВН и на больших высотах

В этом разделе обзора мы рассмотрим экспериментальные результаты, касающиеся пространственного распределения СИИН, которые имеют размеры l_{\perp} от нескольких сотен метров до нескольких километров. Именно эти неоднородности формируют F-рассеяние, проявляющееся как F_{spread} на ионограммах вертикального зондирования.

Динамика развития СИИН и их распределение по ВО ионосферы были подробно исследованы на среднеширотном нагревном стенде «Боулдер» (США) [Allen, et al., 1974]. Выполненные эксперименты показали, что в вечерних условиях в первые секунды после включения ВН рассеянный сигнал сначала приходит всего из нескольких локальных областей, число которых нарастает с увеличением длительности модификации ионосферы. При мощности ВН $P_{эфф} \approx 100$ МВт полного своего развития F_{spread} достигает приблизительно после трех минут воздействия, но и тогда вариации плотности плазмы по ВО имеют выраженную пятнистую структуру, форма которой может заметно меняться во времени и в зависимости от высоты расположения неоднородностей. Эти эксперименты позволили также установить, что СИИН регистрировались в интервале высот от ~ 150 км до высоты максимума F2-слоя ~ 250 км — наибольшей высоты их возможной регистрации (на самом деле они генерировались и на больших высотах).

Кроме перечисленного выше, эти эксперименты продемонстрировали, что при вертикальной ДН излучения мощной радиоволны центр области рассеяния для стационарной стадии развития ИИТ смещен на 15° к югу от вертикали, а сама область с неоднородностями вытянута вдоль геомагнитного поля. Смещение центра области рассеяния к югу в плоскости геомагнитного меридиана сегодня связывается с проявлением эффекта магнитного зенита, свойства которого были рассмотрены выше. Более интенсивная генерация СИИН в области магнитного зенита отмечалась также в работе [Djuth et al., 2006].

Высотная зависимость характеристик СИИН исследовалась в работах [Ерухимов и др., 1977, 1987] при просвечивании ВО ионосферы сигналом геостационарного ИСЗ ATS-6 с приемом этого сигнала в двух пространственно-разнесенных пунктах. Для одного из них луч на ИСЗ проходил через центральную часть ВО (высоты 240–280 км), а для второго — на 20–60 км выше. Эти эксперименты позволили определить, что в центральной части ВО вблизи высоты отражения ВН наблюдается наиболее интенсивное развитие неоднородностей с $l_1 \approx 200$ –800 м, генерация которых связывается с самофокусировочной неустойчивостью мощной радиоволны [Gurevich, 1978]. На больших высотах наиболее интенсивными являются неоднородности километровых масштабов. Спектр ИИН здесь близок спектру естественных неоднородностей без какого-либо выраженного максимума в области масштабов $l_1 \approx 200$ –800 м. Согласно [Ерухимов и др., 1987], появление ИИН на высотах выше максимума F2-слоя ионосферы определяется либо усилением естественных неоднородностей плотности плазмы при ее нагреве мощным КВ-радиоизлучением, либо процессами переноса плазменных возмущений из центральной части ВО ионосферы, т. е. из области генерации наиболее интенсивной первичной ИИТ. Следует отметить, что в центральной части ВО спектр ИИН после включения ВН стремится во всем интервале исследуемых масштабов к форме, соответствующей их спек-

тру на больших высотах (к форме спектра естественных неоднородностей). В работе [Выборнов и др., 1986] по измерениям вблизи высоты отражения ВН было подтверждено присутствие в спектре ИИН максимума в диапазоне масштабов $l_1 \approx 0.8$ –2 км для их размеров в северо-южном направлении. Расхождение результатов в работах [Ерухимов и др., 1977; Выборнов и др., 1986] связывается с существованием анизотропии ИИН в ортогональной геомагнитному полю плоскости с большими поперечными размерами неоднородностей в направлении восток–запад; коэффициент анизотропии при этом составляет $\gamma \approx 2$ –3.

Одновременные измерения в двух пунктах [Ерухимов и др., 1977] дали также возможность оценки по времени запаздывания начала развития ИИН на высотах выше максимума F2-слоя величины продольной (вдоль линий геомагнитного поля) скорости перемещения плазменных возмущений, вызывающих генерацию (усиление) неоднородностей. Она составила $V_{\parallel} \geq 10^5$ см/с. Столь высокая скорость переноса плазменных возмущений вверх от области их наиболее интенсивной генерации вблизи высоты отражения ВН была многократно подтверждена результатами и других исследований, часть из которых будет рассмотрена ниже.

В работе [Фролов и др., 2014] было показано, что интенсивность СИИН при модификации F2-области ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации в утренние, вечерние и ночные часы на 6–10 дБ превышала интенсивность таких неоднородностей, возбуждаемых волнами Х-поляризации. Это говорит о том, что помимо эффектов, связанных с самофокусировочной неустойчивостью мощных радиоволн, эффекты резонансного взаимодействия волн О-поляризации с магнитоактивной плазмой должны играть здесь важную роль. Это относится как к влиянию области отражения ВН О-поляризации, где происходит наиболее интенсивный разогрев плазмы [Васьков и др., 1981a], так и к влиянию МИИН на генерацию СИИН, как это объясняется в теории нелинейного структурирования плазмы [Гуревич, 2007; Gurevich et al., 1998], в рамках которой рассматривается самофокусировка мощной радиоволны на среднемасштабных неоднородностях, заполненных МИИН с пониженной плотностью плазмы. Подтверждением последнего служат полученные в работах [Frolov et al., 2000; Фролов и др., 2008a] результаты, которые показывают, что интенсивность СИИН сильно уменьшается при приближении частоты ВН к гармонике гирочастоты электронов в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Это подтверждает сильное влияние возбуждаемой мощной радиоволной высокочастотной верхнегибридной плазменной турбулентности (включая и МИИН) на их генерацию.

Выше мы обсуждали результаты радиотомографических измерений, выполненных в августе 2007 г. Детальный анализ флуктуаций амплитуды и фазы зарегистрированных в этих измерениях сигналов на 150 МГц показал, что южный край ВО выделяется повышенным уровнем флуктуаций амплитуды и фазы, при этом частота флуктуаций амплитуды сиг-

нала здесь выше, чем на северном крае ВО [Мясников, Муравьева, 2007; Мясников, 2007]. Аналогичные результаты были получены в экспериментах на стенде «Боулдер» [Bowhill, 1974; Pope, Fritz, 1974]. Кроме того, в работе [Bowhill, 1974] было показано, что СИИН регистрировались в интервале высот от 200 до 450 км, причем на высотах внешней ионосферы неоднородности имели приблизительно такую же интенсивность, как и на высотах ниже максимума F2-слоя. Выполненные исследования позволили также установить, что неоднородности плотности плазмы с $l_{\perp} \approx 100\text{--}700$ м преимущественно сосредоточены в крупномасштабных с $l_{\perp} \approx 10\text{--}20$ км образованиях. Это говорит о том, что их распределение сильно неоднородно по ВО. То, что распределение ИИН с масштабами от десятка до нескольких сот метров обладает существенно неоднородными свойствами в пространстве, было продемонстрировано в работе [Алимов и др., 2009] на основе мультифрактального анализа результатов измерений флуктуаций сигнала маяков низкоорбитальных спутников на частотах 150 и 400 МГц, прошедших через ВО ионосферы.

В заключение отметим, что в ночных условиях развитие СИИН может стимулировать включение естественных механизмов их генерации. Это проявляется в том, что F-рассеяние (F_{spread} на ионограммах), сгенерированное во время нагрева ионосферы, может потом сохраняться в течение длительного времени уже в отсутствие модификации ионосферы [Utlaut, Violette, 1974].

3.2. Результаты исследований характеристик СИИН, возбуждаемых на высотах ниже высоты отражения ВН

В настоящем разделе обзора мы остановимся на свойствах СИИН, появление которых регистрируется на высотах ниже высоты отражения ВН (вплоть до высоты E-области ионосферы) вне области резонансного взаимодействия мощной радиоволны O-поляризации с плазмой. Эти исследования выполнялись при зондировании ВО ионосферы с помощью импульсных радаров, один из которых располагался непосредственно на стенде СУРА, второй — в 100 км к западу от стенда в п. Зименки, третий — в 170 км к востоку от стенда около Казани. Зондирование в разных экспериментах осуществлялось в диапазоне частот 1.68–7.5 МГц, что перекрыло диапазон зондируемых высот от 100–120 км (высоты E-области) до высоты максимума F2-слоя ионосферы. При этом размер зондируемых ИИН l_{\perp} находился в пределах от 100 до 400 м, уменьшаясь с ростом частоты или высоты зондирования.

В работах по модификации ионосферы мощными КВ-радиоволнами [Бахметьева и др., 1989; Гудин и др., 1990; Hedberg et al., 1983] отмечалось, что, развиваясь вначале в области отражения ВН, ИИН со временем начинают регистрироваться на высотах на десятки километров как ниже, так и выше этой высоты (от высоты E-слоя до высоты максимума F2-слоя ионосферы). Если полагать, что ИИН сна-

чала генерируются вблизи высоты отражения ВН, а затем «прорастают» на большие и меньшие высоты, то, согласно измерениям [Бахметьева и др., 1989], скорость распространения возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля, стимулирующих генерацию ИИН, должна составлять $V_{\parallel} \geq 2 \cdot 10^5$ см/с, что заметно превышает скорость амбиполярной диффузии на высотах F2-области ионосферы. Ранее к такому же выводу пришли авторы работы [Ерухимов и др., 1977], рассматривая появление неоднородностей километровых масштабов на высотах, больших высоты отражения ВН.

Начиная с 2006 г. изучение свойств СИИН на высотах 110–180 км было продолжено на стенде СУРА с помощью импульсного зондирования на частоте 2.95 МГц, при этом зондирующий передатчик располагался на территории стенда. Результаты выполненных исследований представлены в работах [Бахметьева и др., 2010, 2012]. На их основе можно сделать следующие выводы.

1. При нагреве F2-области ионосферы с $P_{\text{эфф}} \approx 100$ МВт рассеянные сигналы из области отражения ПВ на высотах 110–180 км, а следовательно, и генерация СИИН на этих высотах, начинали регистрироваться спустя время $\tau_0 \approx 5\text{--}10$ с после включения ВН. В ряде случаев, как и в работе [Hysse et al., 1996], рассеяние наблюдалось от областей с двух разных высот, между которыми рассеяние отсутствовало. Последнее прямо указывает на то, что область, занятая рассеивающими неоднородностями, может иметь слоистую по высоте структуру, что нельзя объяснить в рамках модели «прорастания» ИИН от области их генерации на высоте отражения ВН.

2. Характерное время релаксации ИИН, вызывающих рассеяние, составляет 10–20 с на ее первой стадии и 25–40 с на второй, если процесс релаксации носит двухступенчатый характер. Считая, что в данном случае расплывание неоднородностей обусловлено продольной амбиполярной диффузией, можно оценить характерный продольный масштаб рассеивающих неоднородностей как $l_{\parallel} \approx 300\text{--}400$ м. Отсюда следует, что неоднородности на высотах 110–180 км можно считать близкими изотропным.

3. Предполагается, что возмущения, вызывающие развитие ИИН в нижней ионосфере, генерируются в области резонансного взаимодействия ВН с плазмой и далее распространяются вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля. В этом случае измеренные времена задержки появления рассеянных сигналов позволяют оценить скорость перемещения этих возмущений по высоте (вдоль силовых линий геомагнитного поля). Полагая, что разность между высотой отражения волны накачки и высотой зондирования составляет $\Delta h \approx 45\text{--}100$ км, а время задержки начала роста неоднородностей по отношению к началу модификации ионосферы составляет $\tau_0 \approx 1\text{--}5$ с, получаем оценку скорости перемещения этих возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля $V_{\parallel} \approx (0.1\text{--}1) \cdot 10^7$ см/с. Эта величина на высотах 130–180 км намного превосходит тепловую скорость ионов и в ряде случаев близка тепловой скорости электронов. Это полностью исключает воз-

возможность объяснения расширения области с ИИН за счет процессов, определяемых амбиполярным характером диффузии в магнитоактивной плазме.

Таким образом, выполненные исследования продемонстрировали, что уже через несколько секунд ИИН с масштабами $l_{\perp} \approx 100-400$ м появляются в широкой области высот 110–180 км практически одновременно с появлением ИИН таких же масштабов вблизи уровня отражения ВН. При этом следует полагать, что эти СИИН не являются результатом их «прорастания» от области отражения ВН, а под действием тех или иных механизмов должны генерироваться прямо на высотах E- и F1-областей ионосферы. Природу этих механизмов еще предстоит выяснить.

3.3. О механизме генерации ИИН с $l_{\perp} \approx 50-200$ м

Неоднородности таких масштабов занимают особое место в спектре ИИН. С одной стороны, размер l_{\perp} больше максимального размера МИИН $l_{\perp} \approx 30-50$ м, возбуждаемых при развитии тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости, а с другой — меньше возможного размера неоднородностей с $l_{\perp} \approx 300-800$ м, генерируемых за счет развития самофокусирующей неустойчивости. Эти ИИН имеют высокую интенсивность и вызывают сильное рассеяние радиоволн КВ-диапазона [Ерухимов и др., 1980; Zabolin et al., 2002]. Механизм их генерации до сих пор остается невыясненным, что определяет интерес к изучению их характеристик.

В исследованиях, результаты которых представлены ниже, модификация ионосферы осуществлялась с помощью нагревного стенда СУРА; зондирование ВО ионосферы выполнялось с помощью модифицированного ионозонда «Циклон», расположенного в 170 км к западу от стенда на территории загородной лаборатории Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета. Выполненные эксперименты продемонстрировали, что с помощью такого ионозонда можно проводить изучение свойств ИИН масштабов $l_{\perp} \approx 50-200$ м на высотах от E-области ионосферы до высоты максимума слоя F2 [Болотин и др., 2012]. Из полученных данных следует, что генерация этих неоднородностей происходит практически одновременно во всей толще F2-области. При этом вызывающий генерацию ИИН агент, если он индуцируется в области отражения ВН, должен распространяться вниз со скоростью $V_{\parallel} \geq 10^6$ см/с, что заведомо больше тепловой скорости ионов V_{Ti} . Это еще раз подтверждает сделанный ранее вывод, что появление флуктуаций плотности плазмы на более низких высотах обусловлено не диффузионным «прорастанием» ИИН вниз от высоты отражения мощной радиоволны, где развивается наиболее интенсивная ИИТ и наблюдаются наиболее интенсивные ИИН.

Среди других полученных результатов отметим следующие. Как было установлено в работе [Болотин и др., 2012], в конце сеанса нагрева ионосферы длительностью 10 мин рассеянный сигнал наблюдался в более широком интервале задержек, чем в

его начале. Последнее свидетельствует о том, что за 10 мин модификации ионосферы происходит увеличение горизонтальных размеров области рассеяния от ~ 40 км в начале воздействия (области, засвеченной пучком мощных радиоволн) до ~ 200 км в его конце, что уже заметно превышает эти размеры. В работах [Болотин и др., 2012; Фролов и др., 2012] было показано, что генерация неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50-200$ м обладает гирогармоническими свойствами: интенсивность неоднородностей и время их развития зависит от величины отстройки δf частоты ВН от частоты гирогармоники электронов в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Наиболее слабое рассеяние наблюдается для $\delta f \approx 0$, когда в области взаимодействия ВН с плазмой выполняются условия двойного резонанса: частота ВН равна частоте ВГР и частоте гирогармоники. В-третьих, выполненные эксперименты [Фролов и др., 2014] показали, что неоднородности с $l_{\perp} \approx 50-200$ м возбуждаются при модификации ионосферы мощными радиоволнами X-поляризации, хотя их интенсивность в этом случае оказывается на 6–10 дБ меньше по сравнению с модификацией ионосферы мощными радиоволнами O-поляризации.

Таким образом, на основании выполненных исследований можно утверждать, что генерация ИИН этого диапазона масштабов заведомо определяется несколькими механизмами, один из которых должен быть связан с развитием тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости и с генерацией МИИН вблизи высоты отражения ВН. Вторым механизмом для неоднородностей, генерируемых на высотах отражения ВН, скорее всего, связан с перекачкой по спектру искусственной турбулентности от ИИН больших масштабов к меньшим, как это отмечалось, например, в работах [Филипп и др., 1991; Nyssel et al., 1996]. В этом случае гирогармонические свойства генерации этих неоднородностей могут проявляться или отсутствовать в зависимости от механизма генерации ИИН с $l_{\perp} > 200$ м. Наконец, генерация неоднородностей на высотах E-слоя среднеширотной ионосферы должна определяться отдельным механизмом, свойства которого еще достаточно слабо изучены, и здесь еще предстоит выполнить необходимые экспериментальные и теоретические исследования.

4. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ВОЗМУЩЕННОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ИИН

В этом разделе обзора по результатам выполненных в последние годы исследований [Фролов и др., 2014, 2015a] кратко представлены основные выводы, относящиеся к изучению свойств крупномасштабных ИИН (КИИН) размером l_{\perp} от единиц до нескольких десятков километров. Их развитие вблизи высоты отражения ВН, согласно работе [Ерухимов и др., 1987], скорее всего, связано с усилением естественных неоднородностей при нагреве плазмы мощными радиоволнами.

Выполненные на стенде СУРА экспериментальные исследования однозначно демонстрируют, что при модификации ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации КИИН наиболее эффективно генерируются в области магнитного зенита для ВН, где, как было показано выше, наблюдается наиболее интенсивное возбуждение МИИН и СИИН, а также 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 О-волнами [Фролов и др., 2014], следует заключить, что резонансное взаимодействие мощных радиоволн О-поляризации с плазмой, приводящее к ее сильному разогреву и турбулизации, должно играть при этом существенную роль.

Вторым важным результатом, полученным в работе [Фролов и др., 2014], явилось обнаружение усиления генерации ИИН с масштабами $l_{\perp} \approx 5-10$ км на краю ДН излучения пучка мощных радиоволн в области, где имеют место наиболее сильные градиенты светового и теплового давления, которые стимулируют образование соленидальных токов, опоясывающих пучок мощных радиоволн. Эти токи, в свою очередь, могут усилить генерацию КИИН. Подобный механизм рассматривался, например, в работах [Гущин и др., 2008; Kuo et al., 2010]. Отметим, что эффект «края диаграммы» наблюдается для пучков мощных радиоволн обеих поляризааций.

Наконец, в работе [Фролов и др., 2014] было отмечено, что в случае КИИН их вынос из области генерации в результате горизонтального дрейфа плазмы может составлять от нескольких десятков до сотни километров, что оказывает существенное влияние на результаты измерений при просвечивании ВО ионосферы сигналами ИСЗ навигационных систем GPS/GLONASS. Это необходимо учитывать при интерпретации результатов проводимых здесь экспериментов.

5. ВОЗМУЩЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ, РЕГИСТРИРУЕМЫЕ НА ВЫСОТАХ ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ (ПО ДАННЫМ ИСЗ DEMETER)

Первые исследования свойств плазменной турбулентности, индуцируемой во внешней ионосфере Земли при модификации F2-области излучаемыми стендом СУРА мощными радиоволнами, проводились в 1992–1993 гг. с использованием бортовой аппаратуры нескольких ИСЗ [Костин и др., 1993; Васьков и др., 1995; Гдалевич и др., 2003; Vas'kov et al., 1998]. Эти исследования позволили установить следующее.

1. При воздействии мощной радиоволны на F2-слой ионосферы наблюдалось возбуждение низкочастотных волн в ОНЧ- и КНЧ-диапазонах, которые генерировались в возмущенной силовой трубке диаметром 100–200 км и распространялись вдоль нее.

2. Наблюдалось заметное увеличение электрического поля плазменных шумов во внешней ионосфере в диапазоне 0.1–10 МГц.

3. Имело место формирование или увеличение эффективности ОНЧ-каналов, ответственных за распространение свистящих атмосфериков вдоль силовых линий геомагнитного поля между магнитосопряженными точками; полученные характерные времена развития и релаксации всего канала составляли ~1 мин и 2–4 мин соответственно.

4. Происходило возмущение силовой трубки диаметром около 200 км примерно через 1 мин после начала нагрева с образованием искусственной неоднородности (дакта) на магнитосферном участке распространения свистов.

Следует признать, что эти эксперименты носили единичный характер и из-за аппаратных ограничений не позволили провести детальные исследования всего комплекса наблюдаемых явлений.

В этом разделе обзора представлены результаты исследований свойств возбуждаемых во внешней ионосфере искусственных плазменных возмущений. Исследования проводились в 2005–2010 гг. с помощью бортовой аппаратуры французского микро-ИСЗ DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions). Спутник имел круговую солнцесинхронную орбиту высотой ~700 км и пролетал над стендом СУРА приблизительно в 18:00–18:30 UT в условиях ночной ионосферы и около 07:30–08:00 UT в дневных условиях. Он обладал широким набором бортовой аппаратуры, позволяющей проводить измерения основных параметров плазмы, концентрацию, температуру, ионный состав, скорость ионов, напряженность электрического и магнитного полей в широком диапазоне частот, потоки энергичных электронов. Подробное описание характеристик размещенной на спутнике аппаратуры приведено в [Planetary and Space Sci., 2006].

Результаты исследований, выполненных по программе СУРА–DEMETER, опубликованы в работах [Рапопорт и др., 2007; Фролов и др., 2008б, 2008в, 2013, 2015б; Марков и др., 2010; Rapoport et al., 2010]. При проведении измерений для создания искусственных плазменных возмущений в ионосфере Земли стенд включался на 15–20 мин за 13–18 мин до времени наибольшего сближения ИСЗ с центром возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на область с интенсивной ИИТ, возбуждаемой вблизи высоты отражения мощной радиоволны. Одним из наиболее значимых результатов, выполненных по программе экспериментов СУРА–DEMETER, явилось обнаружение на высотах внешней ионосферы формирования крупномасштабных дактов плотности плазмы, размеры которых поперек геомагнитного поля составляют ~100 км [Рапопорт и др., 2007; Фролов и др., 2008б, 2008в].

Что касается свойств пространственной структуры плазменных возмущений во внешней ионосфере, полученные результаты сводятся к следующему.

1. В условиях модификации ночной ионосферы было обнаружено присутствие сильных крупномасштабных возмущений с повышенной на 10–40 %

плотностью плазмы (дактов) с размерами 80–110 км вдоль траектории ИСЗ приблизительно в направлении север–юг поперек геомагнитного поля. Подобный дакт хорошо виден на представленной на рис. 3 радиотомограмме, где он обнаруживается на высотах от 500 до 800 км — наибольшей возможной высоте восстановления радиотомограмм. Отличительной чертой таких дактов является высокий уровень флуктуаций электромагнитных полей в диапазоне частот от нескольких герц до десятков килогерц, а также наблюдающееся в ряде случаев значительное (на десятки дБ) увеличение интенсивности сигналов от ОНЧ-передатчиков и уширение их частотного спектра до $\pm(200\text{--}500)$ Гц [Raport et al., 2010].

2. Формирование дактов наблюдалось, только когда нагрев ионосферы осуществлялся с достаточно высокой мощностью ВН $P_{\text{эфф}} \geq 40$ МВт в условиях не слишком высокой плотности плазмы в F2-области ионосферы, когда $f_oF2 \leq 5$ МГц.

3. С точки зрения наибольшей эффективности нагрев ионосферы должен осуществляться на частоте ВН, на ~ 0.5 МГц ниже критической частоты f_oF2 . В экспериментах, когда $f_{\text{ВН}} \approx f_oF2$, эффективность формирования дактов плотности плазмы была низкой либо их генерация вообще не наблюдалась. Это может быть следствием прохождения излучаемой мощности сквозь ионосферу в результате понижения плотности плазмы вблизи уровня отражения мощной радиоволны, как это рассматривалось в работе [Фролов и др., 2013б]. Большая (1 МГц) разность между f_o и f_oF2 обычно приводит к уменьшению эффективности возбуждения ИИТ из-за уменьшения высоты отражения мощной радиоволны и роста на этой высоте градиента плотности плазмы.

4. При модификации ионосферы в дневное время образования дактов плотности плазмы не было обнаружено.

5. Согласно работе [Raport et al., 2010], дакты с избыточной плотностью плазмы заполнены внутри мелкомасштабными неоднородностями с $l_{\perp} \approx 10$ м — 1 км. Часто в них обнаруживается присутствие сильных (до 10–30 %) вариаций плотности плазмы с размерами неоднородностей 15–20 км [Рапорт и др., 2007; Фролов и др., 2015б].

6. Не было обнаружено искусственных плазменных возмущений в магнитосопряженной к стенду СУРА области ионосферы, даже когда длительность модификации F2-области ионосферы была увеличена до 30–40 мин.

Как сами дакты, так и присутствующие в них более мелкомасштабные неоднородности плотности плазмы различных размеров l_{\perp} оказывают сильное влияние на проходящее через них радиоизлучение различных диапазонов. Так, например, они обеспечивают каналирование волн ОНЧ-диапазона [Raport et al., 2010; Айдакина и др., 2014] и вариации фазы сигналов дециметрового диапазона навигационных систем GPS/GLONASS [Фролов и др., 2015а]. Заметим, что генерация ИИН декаметровых масштабов на высотах выше максимума F2-слоя ионосферы обнаруживается радиолокационными методами, по крайней мере, до $h \approx 500$ км [Митяков и др., 2010].

6. ВОЗБУЖДЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ИОНОСФЕРНЫХ ВЫСОТАХ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА СУРА

В этом разделе обзора приведены результаты исследований иного типа возмущений — волновых возмущений плотности плазмы (или перемещающихся ионосферных возмущений), которые генерируются на ионосферных высотах при периодическом нагреве ионосферной плазмы мощными электромагнитными радиоволнами. Эти ВВ, как будет показано ниже, по своим характеристикам отвечают внутренним гравитационным волнам и могут распространяться на значительные расстояния от области их возбуждения. Представленная на рис. 3 радиотомограмма демонстрирует появление таких ВВ в широкой области пространства, которая захватывает, по крайней мере, интервал широт 44–68° N. Заметим, что в этом случае периодическая модификация ионосферы в режиме 15 мин — излучение, 15 мин — пауза осуществлялась в течение 2 ч до пролета ИСЗ. Ниже на основе выполненных в последние годы на стенде СУРА экспериментов по диагностике ВВ мы рассмотрим их характеристики и условия возбуждения, а также то влияние, которое они могут оказывать на турбулилизацию ионосферной плазмы.

В последние годы регистрация ВВ, индуцируемых работой стенда СУРА, осуществлялась около Харькова с помощью доплеровского радара вертикального зондирования на загородной лаборатории Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина и с помощью радара некогерентного рассеяния Института ионосферы. Измерения выполнялись, как правило, в спокойных геомагнитных условиях при низком уровне естественной возмущенности ионосферы. Однако даже в этих условиях во время прохождения солнечного терминатора уровень генерируемых при этом ВГВ не позволял с необходимой надежностью регистрировать появление искусственных ВВ.

Результаты исследований свойств ВВ (ПИВ), возбуждаемых при периодическом нагреве ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением стенда СУРА, представлены в работах [Черногор, Фролов, 2012, 2013, 2014; Черногор, 2014]. В этих экспериментах стенд излучал мощную радиоволну с амплитудной модуляцией типа меандр с периодом от 1 до 60 мин. На основе этих исследований можно сделать следующие выводы.

1. Периодический нагрев верхней ионосферы мощным радиоизлучением практически во все сезоны приводил на высотах 100–500 км к генерации или усилению ВВ с периодом повторения циклов нагрев/пауза, которые регистрировались в районе Харькова на расстоянии $R \approx 1000$ км от стенда СУРА. В результате выполненных исследований было установлено, что наиболее эффективным режимом излучения стенда для генерации ВВ был режим,

в котором для модификации ионосферы использовались радиоволны О-поляризации с длительными интервалами нагрева и паузы (15–30 мин каждый). Эффективная мощность излучения этих волн $P_{\text{эфф}}$ должна быть не меньше 40–50 МВт, излучались они в направлении магнитного зенита для усиления генерации ИИТ. Эффективность генерации ВВ увеличивается при приближении частоты ВН к f_oF_2 . Воздействие мощными радиоволнами Х-поляризации или О-волнами только на нижнюю ионосферу не приводило к эффективной генерации ВВ. Все это указывает на то, что источник их генерации находится в верхней (F2-область) ионосфере и интенсивный разогрев плазмы в результате резонансного взаимодействия с ней мощной радиоволны О-поляризации играет здесь важную роль.

2. Скорость распространения ВВ с периодами 20–60 мин обычно составляла 300–500 м/с на высотах $h \approx 120$ –200 км, возрастая с высотой.

3. Относительная амплитуда вариаций концентрации электронов для регистрируемых ВВ составляла около 1–10 %. Отмечается, что в дневных условиях амплитуда регистрируемых ВВ в 2–5 раз больше, чем в ночные часы. В дневные часы амплитуда регистрируемых над Харьковом ВВ возрастает в 5–20 раз при увеличении высоты от 120 до 300 км.

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

5. По своим характеристикам ВВ с периодами 10–30 мин соответствуют ВГВ.

Генерация искусственных ВВ при периодическом нагреве ионосферной плазмы мощным радиоизлучением, который почти всегда используется в ионосферных исследованиях для многократного создания плазменных возмущений, может иметь ряд важных последствий. Из сказанного выше ясно, что эти возмущения могут распространяться на значительные расстояния. В то же время известно (см., например, [Гершман, 1989; Афраймович и др., 2006; Huang et al., 1994]), что ВГВ естественного происхождения благодаря созданию дополнительных градиентов плотности плазмы или иных причин вызывают развитие ионосферных неоднородностей различных масштабов — от сотен метров до десятков километров, т. е. оказывают влияние на изменение состояния ионосферной плазмы.

Как было показано выше, генерация ВВ происходит при периодическом нагреве ионосферной плазмы мощными КВ-радиоволнами, излучаемыми нагревными стендами. В оптимальных условиях их возбуждения ВВ имеют амплитуду, сравнимую с естественными ВГВ умеренной интенсивности. Это позволяет предполагать, что модификация ионосферы может проявляться на расстояниях 1000 км и более от местоположения нагревного стенда, что необходимо учитывать при рассмотрении некоторых свойств ИИТ и ее влияния на распространение радиоволн различных диапазонов. Так, в работе [Chudnovsky et al., 2014] сообщалось, что по измерениям сигналов ИСЗ навигационной системы GLONASS на приемных станциях в районе Москвы

в периоды работы стенда СУРА наблюдались сильное уменьшение интенсивности сигнала, или появление быстрых флуктуаций его амплитуды, или появление флуктуаций электронной плотности с периодом 5–10 мин в течение 0.5–1 ч. Не исключено, что это связано с прохождением индуцированных работой стенда СУРА ВГВ и генерацией неоднородностей плотности плазмы. В этом направлении выполнены только первые эксперименты. Их продолжение и накопление новых экспериментальных данных, несомненно, позволит дать более аргументированное заключение о роли возбуждаемого нагревом ионосферы ВГВ в возбуждении ионосферной турбулентности на больших от стенда СУРА расстояниях.

Выполненные исследования позволяют сделать следующий важный вывод. Поскольку ВГВ по своей природе являются возмущениями нейтральной атмосферы, с необходимостью следует заключить, что при модификации ионосферы мощной КВ-радиоволной, помимо нагрева электронной компоненты плазмы и генерации плазменных возмущений различной природы, имеет место возмущение и нейтральной компоненты атмосферы. Предполагается, что с этим может быть также связано обнаруженное на стенде СУРА изменение принимаемой интенсивности микроволнового излучения в линии озона во время модификации ионосферы мощными КВ-радиоволнами [Куликов и др., 2013].

Механизмы генерации ВВ при модификации ионосферы мощными радиоволнами рассматривались в работах [Григорьев, 1975; Караштин и др., 1977; Григорьев, Трахтенгерц, 1999; Черногор, 2012, 2014], оценки возможных возмущений нейтральной компоненты атмосферы были сделаны в работе [Mishin et al., 2012]. Однако следует признать, что эти механизмы по ряду параметров не отвечают наблюдаемым свойствам искусственных ВВ. Необходимо продолжение экспериментальных и теоретических исследований. Заметим, что параллельно с нашими исследованиями эксперименты по генерации ВГВ проводились в последние годы и на стенде HAARP [Pradipta et al., 2015]. В них с использованием различных методов диагностики было показано, что источник возбуждения ВГВ находится в верхней ионосфере, засвеченной пучком мощных радиоволн, а сами волны распространяются от этой области во все стороны.

7. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Представленные в настоящем обзоре экспериментальные данные свидетельствуют о том, что ВО, в которой регистрируется генерация ИИН различных масштабов, занимает по высоте практически все тело ионосферы от Е-области ($h \approx 100$ км) до высот внешней ионосферы (1000 км и более). В горизонтальном направлении она имеет протяженность до 300–500 км, далеко выходя за область ионосферы, засвеченную пучком мощных радиоволн, а с учетом влияния генерируемых ВГВ индуцируемые нагревом ионосферы плазменные возмущения могут обнаруживаться на расстоянии до 1000 км и более от стенда.

Как показали выполненные исследования, возмущения плотности плазмы имеют сложную пространственную структуру. Здесь выделяются область магнитного зенита, где регистрируется генерация наиболее интенсивных ИИН всех масштабов; области фокусирующей и дефокусирующей линз; область высот Е-слоя ионосферы; область, определяемая краем ДН излучения мощных радиоволн; область возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на ВО ионосферы с наиболее интенсивной ИИТ, генерируемой вблизи высоты отражения мощной радиоволны О-поляризации. В каждой из этих областей генерируется ИИТ со своими специфическими свойствами. Более того, ВО над стендом СУРА может иметь пэтчевую структуру, когда формируются несколько локальных областей с высоким уровнем плазменной турбулентности в каждой из них.

Выше на различных примерах было продемонстрировано, как, например, неоднородности с масштабами $l_{\perp} \geq 100$ м могут влиять на развитие стрикционной и тепловой параметрических неустойчивостей и эффекты последствия. С другой стороны, развитие МИИН определяет в ряде случаев свойства генерации СИИН и КИИН. Поэтому при своем развитии различные составляющие ИИТ испытывают сильное взаимовлияние. Это определяет имеющее место многообразие форм эволюции наблюдаемых явлений при модификации ионосферной плазмы мощными КВ-радиоволнами, их зависимость от ионосферных условий. В ряде случаев с этим связана сложность интерпретации получаемых экспериментальных данных.

При рассмотрении структуры ВО ионосферы в области СИИН и КИИН и при анализе получаемых экспериментальных данных надо также иметь ввиду возможность выноса неоднородностей из области их генерации (из центральной части ВО) за счет дрейфа плазмы на ионосферных высотах. Так, при скоростях дрейфа 20–100 м/с и времени жизни ИИН с $l_{\perp} \geq 1$ км от нескольких минут днем до десятка и более минут в вечерней и ночной ионосфере неоднородности могут перемещаться на большие (до 10–100 км) расстояния. Это приводит к тому, что область с ИИН будет иметь вытянутую вдоль вектора скорости дрейфа плазмы форму. Такой эффект выноса неоднородностей из центральной части ВО отмечался в работе [Беликович и др., 1976] и при зондировании ВО ионосферы сигналами спутников навигационных систем GPS/GLONASS [Фролов и др., 2010, 2014, 2015a]. Дрейф плазмы на высотах внешней ионосферы также может оказывать влияние на формирование дактов плотности плазмы.

На всех нагревных стендах проводились интенсивные исследования гирогармонических свойств ИИТ, проявляющихся при приближении частоты ВН к частоте гармоники гирочастоты электронов $n f_{ce}$ в области взаимодействия мощной радиоволны О-поляризации с плазмой. Здесь $n=4, \dots, 7$ — номера гирогармоник, около которых для стенда СУРА может излучаться ВН, $f_{ce} \approx 1.3\text{--}1.35$ МГц — электронная циклотронная частота. Так, например, мно-

гочисленные эксперименты по изучению свойств искусственного радиоизлучения ионосферы показали, что его характеристики испытывают сильные вариации, когда частота ВН изменяется в пределах $\pm(100\text{--}200)$ кГц около $n f_{ce}$, а при $f_{ВН} \approx n f_{ce}$ имеет место подавление генерации тепловых компонент ИРИ [Stubbe, Hagfors, 1997; Frolov et al., 2001; Leyser, 2001; Sergeev et al., 2006] и генерации МИИН [Фролов и др., 2012; Honary et al., 1999]. Выполненные измерения продемонстрировали, что в области гирогармонического резонанса наблюдается подавление генерации и СИИН с $l_{\perp} \approx 0.1\text{--}1$ км [Фролов и др., 2008a; Frolov et al., 2000]. В то же время на частотах немного выше частоты гирогармоники в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой, согласно работе [Gurevich, Zybin, 2006], должна наблюдаться генерация интенсивных сверхмелкомасштабных (с $l_{\perp} \approx 10\text{--}20$ см) неоднородностей плотности плазмы. Экспериментальное обнаружение таких неоднородностей и изучение их свойств является одной из приоритетных задач сегодняшнего дня. Полученные здесь первые результаты представлены в работах [Фролов и др., 2012; Milikh et al., 2008; Najmi et al., 2014]. В настоящей работе гирогармонические свойства ИИТ не обсуждались, поскольку собранный здесь экспериментальный материал весьма обширен и требует отдельного рассмотрения и анализа.

Несмотря на значительные успехи в исследованиях свойств ИИТ, генерируемой в среднеширотной ионосфере, некоторые проблемы еще остаются нерешенными. Это, в первую очередь, касается выяснения: а) механизмов генерации вторичной турбулентности далеко от областей резонансного взаимодействия мощной КВ-радиоволны О-поляризации с плазмой; б) механизмов генерации плазменной турбулентности при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации; в) механизмов формирования дактов с повышенной плотностью плазмы на высотах внешней ионосферы и генерации неоднородностей в них, а также возможного влияния дактов на ионосферно-магнитосферное взаимодействие; г) механизма генерации ВГВ при нагреве ионосферы мощными радиоволнами и их влияния на турбулизацию ионосферной плазмы; д) определения степени влияния ионосферных условий в магнитосопряженной точке на особенности генерации и свойства ИИТ. Имеются также экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что нагрев плазмы мощной радиоволной приводит к появлению направленных движений плазмы в ВО ионосферы [Koloskov et al., 2002]. Неполнота наших знаний по всем этим вопросам существенно ограничивает возможности построения в завершенном виде эмпирической и теоретической моделей развития ИИТ. Здесь требуется продолжение экспериментальных и теоретических исследований.

В обзоре практически не рассматривались динамические характеристики развития и релаксации ИИН различных масштабов. Накопленный здесь материал огромен и анализировался уже во многих работах. Не рассматривались в обзоре детально и

свойства ИИТ, генерируемой на высотах Е-слоя ионосферы, поскольку эта турбулентность обладает специфическими свойствами и требует отдельного исследования. Наконец, мы ограничились только рассмотрением свойств ИИН, генерируемых в среднеширотной ионосфере. Как показали эксперименты, выполненные в авроральных широтах на стенде EISCAT-Heating [Благовещенская, 2001], в таких условиях модификация ионосферной плазмы может вызывать появление локальной суббуревой активности, что не типично для средних широт. Кроме того, как показали последние исследования [Blagoveshchenskaya et al., 2013, 2014], при модификации авроральной ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации наблюдаются интенсивная генерация декаметровых ИИН и появление даже искусственных оптических свечений атмосферы, чего не наблюдается в среднеширотной ионосфере [Фролов и др., 2015a; Berhardt et al., 2000]. При этом в условиях модификации авроральной ионосферы мощными волнами Х-поляризации отсутствует генерация главного спектрального максимума в спектре ИРИ (DM — downshifted maximum), который является индикатором развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости и генерации МИИН в авроральной и среднеширотной ионосфере. В чем причина такого сильного расхождения свойств ИИТ, генерируемой в средних и авроральных широтах в условиях модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации, еще предстоит выяснить.

Автор выражает благодарность сотрудникам стенда СУРА за оказанную помощь в проведении экспериментальных исследований. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-12-00556 в части анализа полученных экспериментальных данных. Значительная часть представленных в обзоре результатов экспериментов, выполненных в последние годы на стенде СУРА, была получена при финансовой поддержке ФЦП «Геофизика» и РФФИ (гранты № 08-02-00171, 11-02-00374, 13-02-12074, 13-02-12241).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдеев В.Б., Ерухимов Л.М., Метелев С.А. и др. Радиолокационное зондирование мелкомасштабной искусственной ионосферной турбулентности // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 2. С. 251–252.

Айдакина Н.А., Гуцин М.Е., Зудин И.Ю. и др. Лабораторное и численное моделирование распространения радиоволн свистового диапазона частот в замагниченной плазме с мелкомасштабными неоднородностями // XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн»: Сб. докладов. Иркутск, 2014. Т. 3. С. 25.

Алебастров В.А., Бенедиктов Е.А., Иванов В.Н. и др. Особенности развития и релаксации искусственного возмущения ионосферы. Результаты эксперимента // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27, № 2. С. 147–153.

Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Мясников Е.Н. и др. Эффект магнитного зенита и некоторые особенности мультифрактальной структуры мелкомасштабной искусственной ионосферной турбулентности // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 9. С. 679–689.

Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Воейков С.В. Генерация ионосферных неоднородностей при распространении уединенной внутренней гравитационной волны во

время мощной магнитной бури 29–31.10.2003 г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 2. С. 89–104.

Бахметьева Н.В., Игнатъев Ю.А., Коротина Г.С. и др. Пространственно-временные характеристики сигналов обратного рассеяния от искусственной области возмущения // Геомагнетизм и аэронавигация. 1989. Т. 29, № 5. С. 799–805.

Бахметьева Н.В., Дмитриев С.А., Игнатъев Ю.А., Шавин П.Б. Обратное рассеяние радиоволн от искусственной области возмущения на частоте 1.68 МГц // Геомагнетизм и аэронавигация. 1992. Т. 32, № 3. С. 180–182.

Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Вяхирев В.Д. и др. Обратное рассеяние радиоволн искусственными неоднородностями ионосферной плазмы на высотах 120–180 км // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 5–6. С. 338–355.

Бахметьева Н.В., Фролов В.Л., Вяхирев В.Д. и др. О формировании искусственных плазменных возмущений в нижней ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 106–121.

Беленов А.Ф., Бубнов В.А., Ерухимов Л.М. и др. О параметрах искусственных мелкомасштабных неоднородностей // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 12. С. 1805–1813.

Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г. и др. Нелинейные явления в верхней ионосфере // УФН. 1974. Т. 113, вып. 4. С. 732–734.

Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г. и др. Новые результаты исследований нелинейных явлений в ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 4. С. 516–526.

Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г. и др. Дифракция радиоизлучения дискретного источника Кассиопея А на искусственных ионосферных неоднородностях // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19, № 12. С. 1902–1905.

Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. 156 с.

Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н. и др. Стенд «Сура»: исследование атмосферы и космического пространства // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545–576.

Бенедиктов Е.А., Гончаров Н.П., Игнатъев Ю.А. и др. Экспериментальные результаты исследования параметров искусственной области возмущения верхней и нижней ионосферы методом вертикального зондирования // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27, № 1. С. 12–17.

Березин И.В., Белянский В.Б., Будько Н.И. и др. Диагностика процессов возбуждения плазменных колебаний полем мощной радиоволны // Геомагнетизм и аэронавигация. 1991. Т. 31, № 5. С. 874–880.

Благовещенская Н.Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве // СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 287 с.

Богдан А.П., Гридин А.Н., Левков А.В. Декаметровый нагревный стенд // Вестник Харьковского политехнического института. 1980. № 170. С. 44–47.

Бойко Г.Н., Васьков В.В., Голян С.Ф. и др. Искусственная дефокусирующая линза в ионосфере // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39, вып. 11. С. 533–536.

Бойко Г.Н., Васьков В.В., Голян С.Ф. и др. Исследование дефокусировки радиоволн в ионосфере при воздействии мощного радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 8. С. 960–971.

Бойко Г.Н., Ерухимов Л.М., Фролов В.Л. Возбуждение мелкомасштабных неоднородностей вблизи уровня отражения волны накачки // Геомагнетизм и аэронавигация. 1990. Т. 30, № 6. С. 998–1002.

Болотин И.А., Фролов В.Л., Акчурин А.Д. и др. Диагностика искусственных ионосферных неоднородностей

с использованием коротких радиотрасс зондирования // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 66–78.

Будько Н.И., Васьков В.В., Комраков Г.П. и др. Особенности возбуждения мелкомасштабных неоднородностей в резонансной области ионосферной плазмы при наклонном облучении ионосферы мощной радиоволной // Геомагнетизм и аэронавигация. 1989. Т. 29, № 6. С. 973–980.

Васьков В.В., Димант Я.С. Влияние деформации регулярного профиля ионосферной плазмы на аномальное поглощение мощной радиоволны в области резонанса // Геомагнетизм и аэронавигация. 1989. Т. 29, № 3. С. 417–422.

Васьков В.В., Гуревич А.В., Димант Я.С. Крупномасштабное расслоение плазмы при возмущении ионосферы мощной радиоволной // Геомагнетизм и аэронавигация, 1981а. Т. 21, № 5. С. 809–815.

Васьков В.В., Гуревич А.В., Караштин А.Н. Тепловая самофокусирующая неустойчивость плазменных волн в области резонанса // Геомагнетизм и аэронавигация. 1981б. Т. 21, № 6. С. 973–980.

Васьков В.В., Голян С.Ф., Гуревич А.В. и др. Возбуждение верхнегибридного резонанса в ионосферной плазме полем мощной радиоволны // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 43, вып. 11. С. 512–515.

Васьков В.В., Комраков Г.П., Ораевский В.Н. и др. Возникновение плазменных шумов при воздействии мощной радиоволны на F-слой ионосферы по данным спутника АПЭКС // Геомагнетизм и аэронавигация. 1995. Т. 35, № 1. С. 154–158.

Вертоградов Г.Г., Вертоградова Е.Г., Урядов В.П. и др. Кластерная структура искусственной ионосферной турбулентности по данным радарных измерений с помощью ионозонда-радиопеленгатора // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 1–13.

Виленский И.М. О влиянии нелинейности среды на радиоволну, распространяющуюся в ионосфере // ДАН СССР. 1953. Т. 92. С. 525–527.

Виленский И.М. Об одном нелинейном эффекте при распространении радиоволн в ионосфере // ДАН СССР. 1970. Т. 191, № 5. С. 1041–1043.

Выборнов Ф.И., Ерухимов Л.М., Комраков Г.П. и др. Измерение спектра флуктуаций и амплитуды сигналов ИСЗ при воздействии мощного радионизлучения на ионосферу // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29, № 4. С. 491–494.

Гдалевич Г.Л., Клос З., Михайлов Ю.М. Процессы в ионосферной плазме, связанные с нагревом, возникновением электрического поля и ускорением частиц (по данным ИСЗ «Интеркосмос-24») // Геомагнетизм и аэронавигация. 2003. Т. 43, № 5. С. 645–652.

Гершман Б.Н. О влиянии перемещающихся возмущений на возникновение дополнительных ионосферных неоднородностей в области F // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 12. С. 1571.

Гетманцев Г.Г., Комраков Г.П., Коробков Ю.С. и др. Некоторые результаты исследований нелинейных явлений в F-слое ионосферы // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18, № 10. С. 621–624.

Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 683 с.

Гинзбург В.Л., Гуревич А.В. Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле // УФН. 1960. Т. 70. С. 201–246.

Грач С.М., Митяков Н.А., Шварц М.М. Скачок плотности плазмы на развитой стадии тепловой параметрической неустойчивости // Геомагнетизм и аэронавигация. 1989. Т. 29, № 4. С. 590–596.

Григорьев Г.И. О перемещающихся ионосферных возмущениях, возникающих при работе мощных передатчиков // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 12. С. 1801–1805.

Григорьев Г.И., Трахтенгерц В.Ю. Излучение внутренних гравитационных волн при работе мощных нагревных стенов в режиме временной модуляции ионосферных токов // Геомагнетизм и аэронавигация. 1999. Т. 39, № 6. С. 90–94.

Гудин В.А., Дейнеко В.Н., Иванов В.Н. и др. Экспериментальная диагностика искусственных крупномасштабных возмущений верхней ионосферы методом ВНЗ // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33, № 4. С. 506–508.

Гуревич А.В. К вопросу о распространении сильных электромагнитных волн в плазме // Радиотехника и электроника. 1956. Т. 1, № 6. С. 704–719.

Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177.

Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.

Гуревич А.В., Зыбин К.П., Карлсон Х.С. Эффект магнитного зенита // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 9. С. 772–787.

Гущин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В., Стриковский А.В. Параметрическая генерация свистовых волн при взаимодействии высокочастотных волновых пучков с магнитоактивной плазмой // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, вып. 11. С. 834–838.

Ерухимов Л.М., Митякова Э.Е., Мясников Е.Н. и др. О спектре искусственных ионосферных неоднородностей на разных высотах // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 12. С. 1814–1820.

Ерухимов Л.М., Комраков Г.П., Фролов В.Л. О спектре мелкомасштабной части искусственной ионосферной турбулентности // Геомагнетизм и аэронавигация. 1980. Т. 20, № 6. С. 1112–1114.

Ерухимов Л.М., Зюзин В.А., Комраков Г.П. и др. Нагрев ионосферной плазмы мощным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25, № 7. С. 843–844.

Ерухимов Л.М., Ковалев В.Я., Куракин Е.П. и др. Результаты первых экспериментов по возбуждению искусственной ионосферной турбулентности с помощью нагревного стенов «Гиссар» // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 5. С. 662–664.

Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н. и др. Искусственная ионосферная турбулентность (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208–225.

Зюзин В.А., Комраков Г.П., Насыров А.М., Стрекалов В.А. Характеристики ракурсного рассеяния при воздействии мощных радиоволн на ионосферу // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31, № 5. С. 622–624.

Изв. вузов Радиофизика. 1999. Т. 42, № 7–8 (спец. выпуск).

Изв. вузов Радиофизика. 2005. Т. 48, № 9 (спец. выпуск).

Изв. вузов Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11 (спец. выпуск).

Изв. вузов Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2 (спец. выпуск).

Капустин И.Н., Перцовский Р.А., Васильев А.Н. и др. Генерация излучения на комбинационных частотах в области авральной электроструи // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 25, вып. 5. С. 248–251.

Караштин А.Н., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. О возбуждении звука в ионосфере мощными радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 5. С. 787–788.

Коровин А.В., Насыров А.М., Проскурин Е.В., Ягнов Н.Н. Результаты угловых измерений при рассеянии УКВ на искусственных неоднородностях // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24, № 6. С. 675–679.

Костин В.М., Романовский Ю.А., Чмырев В.М. и др. Спутниковые исследования возмущений внешней ионо-

сферы при воздействии мощных КВ-радиоволн на F-область ионосферы // *Космические исследования*. 1993. Т. 31, № 1. С. 84–92.

Куликов Ю.Ю., Фролов В.Л., Григорьев Г.И. и др. Отклик мезосферного озона на нагрев нижней ионосферы мощным КВ-радиоизлучением // *Геоматематика и аэрономия*. 2013. Т. 1, № 1. С. 102–109.

Марков Г.А., Белов А.С., Фролов В.Л. и др. Возбуждение магнитосферного мазера воздействием на ионосферу Земли мощным КВ-радиоизлучением наземного передатчика // *ЖЭТФ*. 2010. Т. 138, вып. 6(12). С. 1037–1042.

Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. О рассеянии обыкновенной волны вблизи точки отражения на мелкомасштабных неоднородностях // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1975. Т. 18, № 9. С. 1273–1278.

Митяков Н.А., Алимов В.А., Зиничев В.А. и др. Исследование мелкомасштабной турбулентности в слое F-ионосферы методом обратного рассеяния коротких радиоволн // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2010. Т. 53, № 5–6. С. 329–337.

Мясников Е.Н. Квазистатическая турбулентность плазмы верхней ионосферы при искусственных и естественных возмущениях: Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2007. 297 с.

Мясников Е.Н., Муравьева Н.В. Характеристики пространственного спектра неоднородностей плазмы, возбуждаемых на средних широтах мощным стендом СУРА // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2007. Т. 50, № 8. С. 722–730.

Насыров А.М. Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. Казань: Изд-во Казанского университета, 1991. 149 с.

Рапопорт В.О., Фролов В.Л., Комраков Г.П. и др. Некоторые результаты измерения характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере мощным КВ-радиоизлучением стенда СУРА // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2007. Т. 50, № 8. С. 709–721.

Терещенко Е.Д., Миличенко А.Н., Фролов В.Л., Юрик Р.Ю. Наблюдение эффекта магнитного зенита с использованием сигналов спутников GPS/GLONASS // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008. Т. 51, № 11. С. 934–938.

Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. и др. Ракурсное рассеяние коротких радиоволн в условиях воздействия на ионосферу мощным наклонным радиоизлучением // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2007. Т. 50, № 8. С. 669–677.

Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Понятов А.А. и др. О структуре и динамике области ионосферы с искусственными мелкомасштабными неоднородностями по данным комплексных измерений характеристик рассеянных радиосигналов // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008. Т. 51, № 12. С. 1011–1025.

Филипп Н.Д., Блаунштейн Н.Ш., Ерухимов Л.М. и др. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. Кишинев: ШТИИИИЦА, 1991. 287 с.

Фролов В.Л. Искусственная плазменная турбулентность верхней ионосферы, возбуждаемая мощным КВ-радиоизлучением наземных передатчиков. Результаты экспериментальных исследований: Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Н. Новгород, 1996 г. 419 с.

Фролов В.Л., Недзвецкий Д.И., Комраков Г.П. Особенности возбуждения искусственного радиоизлучения ионосферы при наклонном воздействии на ионосферу мощной радиоволной // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2005. Т. 48, № 9. С. 743–756.

Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др. Модификация ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением // *УФН*. 2007. Т. 177, № 3. С. 16–26.

Фролов В.Л., Недзвецкий Д.И., Урядов В.П. и др. Гирогармонические свойства среднemasштабной искусст-

венной ионосферной турбулентности, проявляющиеся при нагреве F2-области ионосферы мощной радиоволной O-поляризации // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008а. Т. 51, № 5. С. 367–375.

Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П. и др. Создание дактов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением // *Письма в ЖЭТФ*. 2008б. Т. 88, вып. 12. С. 908–913.

Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П. и др. Спутниковые измерения характеристик плазменных возмущений, создаваемых при нагреве ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением стенда СУРА // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008в. Т. 51, № 11. С. 915–934.

Фролов В.Л., Комраков Г.П., Куницын В.Е. и др. Зондирование возмущенной излучением нагревного стенда СУРА ионосферы сигналами навигационных ИСЗ системы GPS // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2010. Т. 53, № 7. С. 421–443.

Фролов В.Л., Болотин И.А., Комраков Г.П. и др. Гирогармонические свойства генерации искусственных ионосферных неоднородностей // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2012. Т. 55, № 6. С. 393–420.

Фролов В.Л., Митяков Н.А., Шорохова Е.А., Парро М. Структура электрического поля мощной короткой радиоволны во внешней ионосфере Земли // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2013. Т. 56, № 6. С. 361–381.

Фролов В.Л., Болотин И.А., Комраков Г.П. и др. Генерация искусственных ионосферных неоднородностей при воздействии на среднеширотную ионосферу Земли мощными КВ-радиоволнами с необыкновенной поляризацией // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2014. Т. 57, № 6. С. 437–463.

Фролов В.Л., Шорохова Е.А., Куницын В.Е. и др. Особенности возбуждения крупномасштабных неоднородностей плотности плазмы при модификации F2-области ионосферы мощными КВ-радиоволнами // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2015а (в печати).

Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А. и др. Тонкая структура дактов плотности, формируемых при активном радиочастотном воздействии на лабораторную и космическую плазмы // *Письма в ЖЭТФ*. 2015б. Т. 101, вып. 5. С. 342–346.

Черногор Л.Ф. Механизмы генерации колебаний инфразвукового диапазона в верхней атмосфере под действием мощного периодического радиоизлучения // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. Т. 17, № 3. С. 240–252.

Черногор Л.Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе. Харьков, 2014. 541 с.

Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 14–35.

Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Особенности распространения акустико-гравитационных волн, генерируемых мощным периодическим радиоизлучением // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2013а. Т. 56, № 4. С. 219–239.

Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Особенности волновых возмущений в ионосфере при периодическом нагреве плазмы радиоизлучением стенда СУРА // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2013б. Т. 56, № 5. С. 307–321.

Шлюгер И.С. Самомодуляция мощного электромагнитного импульса, отраженного от верхних слоев ионосферы // *Письма в ЖЭТФ*. 1974. Т. 19, вып. 5. С. 247–251.

Ютло У., Коэн Р. Изменение ионосферы под действием мощных радиоволн // *УФН*. 1973. Т. 109, № 2. С. 371–373.

Allen E.M., Thome G.D., Rao P.B. HF phased array observations of heater-induced spread-F // *Radio Sci.* 1974. V. 9, N 11. P. 905–916.

- Bailey V.A. On some effects caused in the ionosphere by electric waves // *Phil. Mag.* 1937. V. 23, N 157. P. 929–960.
- Bailey V.A. Some possible effects caused by strong gyro waves in the ionosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1959. V. 14. P. 299–324.
- Bernhardt P.A., Wong M, Huba J.D., et al. Optical remote sensing of the thermosphere with HF pumped artificial airglow // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N A5. P. 10,657–10,671.
- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K., et al. Plasma modifications induced by an X-mode HF heater wave in the high-latitude F region of the ionosphere // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2013. V. 105–106. P. 231–244.
- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kosch M., et al. Optical and ionospheric phenomena at EISCAT under continuous X-mode HF pumping // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. V. 119, N 12. P. 10,483–10,498. DOI: 10.1002/2014JA020658.
- Bowhill S.A. Satellite transmissions studies of spread-F produced by artificial heating of the ionosphere // *Radio Sci.* 1974. V. 9, N 11. P. 975–986.
- Carroll J.C., Violette E.J., Utlaut W.F. The Platteville high power facility // *Radio Sci.* 1974. V. 9, N 11. P. 889–894.
- Chudnovsky L.S., Golubkov M.G., Frolov V.L., et al. The fluctuation amplitude variation of navigation signals of GLONASS space satellites // IV International Conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety” (AIS-2014). Kaliningrad, Russia, 2014. Paper S-5.
- Djuth F.T., Reinish B.W., Kitrosser D.F., et al. Imaging HF-induced large-scale irregularities above HAARP // *Geoph. Res. Lett.* 2006. V. 33. P. L04107. DOI: 10.1029/2005GL024536.
- Frolov V.L., Erukhimov L.M., Metelev S.A., Sergeev E.N. Temporal behavior of artificial small-scale ionospheric irregularities: Review of experimental results // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. V. 59, N 18. P. 2317–2333.
- Frolov V.L., Chugurin V.V., Komrakov G.P., et al. Study of large-scale irregularities generated in the ionospheric F region by high-power HF waves // *Radiophys. Quant. Electron.* 2000. V. 43, N 6. C. 446–468.
- Frolov V.L., Sergeev E.N., Ermakova E.N., et al. Spectral features of stimulated electromagnetic emissions, measured in the 4.3–9.5 MHz pump wave frequency range // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28, N 16. P. 3103–3106.
- Gordon W.E. HAARP facility in Alaska // *Science.* 1997. V. 275, N 5308. P. 1861.
- Gordon W., Carlson H.C., Showen R.L. Ionospheric Heating at Arecibo: First tests // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76, N 31. P. 7808–7813.
- Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. New York: Springer, 1978. 372 p.
- Gurevich A.V., Dimant Ya.S., Milikh G.M., Vas'kov V.V. Multiple acceleration of electrons in the regions of high-power radio wave in the ionosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1985. V. 47, N 11. P. 1057–1070.
- Gurevich A., Hagfors T., Carlson H., et al. Self-oscillations and bunching of striations in ionospheric modifications // *Phys. Lett.* 1998. A. 239. P. 385–392.
- Gurevich A., Fremouw E., Secan J., Zybin K.P. Large scale structuring of plasma density perturbations in ionospheric modifications // *Phys. Lett.* 2002a. A. 301. P. 307–314.
- Gurevich A.V., Zybin K.P., Carlson H.C., Pedersen T. Magnetic zenith effect in ionospheric modifications // *Phys. Lett.* 2002b. A. 305. P. 264–274.
- Gurevich A.V., Zybin K.P. Strong field aligned scattering of UHF radio waves in ionospheric modification // *Phys. Lett.* 2006. A. 358. P. 159–165.
- Hedberg A., Derblom H., Thide B., et al. Observations of HF backscatter associated with heating experiment at Tromsø // *Radio Sci.* 1983. V. 18, N 6. P. 840–850.
- Hibberd F.H. On the observation of ionospheric self-interaction // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1956. V. 8, N 2. P. 120–122.
- Honary F., Robinson T.R., Wright D.M., et al. First direct observations of the reduced striations at pump frequencies close to the electron gyro harmonics // *Ann. Geophysicae.* 1999. V. 17, N 9. P. 1235–1238.
- Huang C.-S., Miller C.A., Kelley M.C. Basic properties and gravity wave initiation of the midlatitude F region instability // *Radio Sci.* 1994. V. 29, N 1. P. 395–405.
- Hyssel D.L., Kelley M.C., Yampolski Y.M., et al. HF radar observations of decaying artificial field-aligned irregularities // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101, N A12. P. 26,981–26,993.
- J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44, N12 (special iss.).
- J. Atmos. Terr. Phys. 1985. V. 47, N 12 (special iss.).
- J. Atmos. Terr. Phys. 1997. V. 59, N 18 (special iss.).
- J. Geophys. Res. 1970. V. 75, N 31 (special iss.).
- Kelley M.C., Arce T.L., Saloway J., et al. Density depletions at the 10-m scale induced by the Arecibo heater // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100, N A9. P. 17,367–17,376.
- Koloskov A.V., Leyser T.B., Yampolski Yu.M., Beley V.S. HF pump-induced scale radial drift of small-scale magnetic field-aligned density striations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A7. P. 1726–1735. DOI: 10.1029/2001JA000154.
- Kopka H., Stubbe P., Jones T.B., Robinson T. Nonlinear reflectivity of high-power radio waves in the ionosphere // *Nature.* 1982. V. 295. P. 680. DOI: 10.1038/295,680a0.
- Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Vasiliev A.E., et al. Study of GNSS-measured ionospheric total electron content variations generated by powerful HF heating // *Adv. Space Res.* 2011. V. 47, N 10. P. 1743–1749.
- Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Frolov V.L., et al. Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigation satellite radio transmissions // *Radio Sci.* 2012. V. 47, RS0L15. DOI: 10.1029/2011RS004957.
- Kuo S., Cheng W-T., Snyder A., et al. Contracting O/X-mode heater effects on O-mode sounding echo and the generation of magnetic pulsations // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37, L01101. DOI: 10.1029/2009GL041471.
- Leyser T.B. Stimulated electromagnetic emissions by high-frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 98, N 3–4. P. 223–328.
- Milikh G., Gurevich A., Zybin K., Secan J. Perturbations of GPE signals by the ionospheric irregularities generated due to HF heating at triple of electron gyro frequency // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, L22102. DOI: 10.1029/2008GL035527.
- Minkoff J., Kreppel R. Spectral analysis and step response of radio frequency scattering from a heated ionospheric volume // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81, N 16. P. 2844–2856.
- Mishin E., Sutton E., Milikh G., et al. F2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization streams // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39, L11101. DOI: 10.1029/2012GL05204.
- Najmi A., Milikh G., Secan J., et al. Generation and detection of super small striations by F region HF heating // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. V. 119, N 7. DOI: 10.1002/2014JA020038.
- Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., et al. Creation of artificial ionospheric layers using high power HF waves // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37, L02106. DOI: 10.1029/2009GL041895.
- Planetary and Space Sci. 2006. V. 54, N 5. P. 409–557 (special iss.).
- Pope J.H., Fritz R.B. Observations of artificially produced scintillations using satellite transmissions // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79, N 7. P. 1065–1067.
- Pradipta R., Lee M.C., Cohen J.F., Watkins D.J. Generation of artificial acoustic-gravity waves and traveling ionospheric disturbances in HF heating experiments // *Earth, Moon, Planets.* 2015. DOI: 10.1007/s11038-015-9461-2.
- Radio Sci. 1974. V. 9, N 11 (special iss.).
- Rapoport V.O., Frolov V.L., Polyakov S.V., et al. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by

Sura RF heating facility // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, A10322. DOI: 10.1029/2010JA015484.

Rietveld M.T., Kosch M.J., Blagoveshchenskaya N.F. et al. Ionospheric electron heating, optical emissions, and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: Aspect angle dependence // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N A4, 1141. DOI: 10.1029/2002JA009543.

Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by the high power radio waves // *Physics Rep.* 1989. V. 179, N 2–3. P. 79–209.

Sciaccitano A. Phenomenon of the interaction of radio waves; the Luxemburg effect // *Scientia*. 1956. V. 91. P. 206.

Sergeev E.N., Frolov V.L., Grach S.M., Kotov P.V. On the morphology of SEE spectral features in a wide pump wave frequency range // *Adv. Space Res.* 2006. V. 38, N 11. P. 2518–2526. DOI: 10.1016/j.asr.2005.02.046/.

Stubbe P., Hagfors T. The Earth's ionosphere: A wall-less plasma laboratory // *Surveys in Geophysics*. 1997. V. 18, N 1. P. 57–127.

Stubbe P., Kopka H., Dowden R.L. Generation of ELF and VLF waves by polar electrojet modulation: Experimental results // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86, N A11. P. 9073–9078.

Stubbe P., Kopka H., Lauche H., et al. Ionospheric modification experiments in northern Scandinavia // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1982. V. 44, N 12. P. 1025–1041.

Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Gurevich A.V., et al. Radio tomography and scintillation studies of ionospheric electron density modification caused by a powerful HF wave and magnetic zenith effect at mid-latitudes // *Phys. Lett.* 2004. A. 325. P. 381–388.

Utlaut W.F. An ionospheric modification experiment using very high-power, high-frequency transmission // *J. Geophys. Res.* 1970. V. 75, N 31. P. 6402–6405.

Utlaut W.F., Violette E.J. A summary of vertical incidence radio observations of ionospheric modification // *Radio Sci.* 1974. V. 9, N 11. P. 895–903.

Vas'kov V.V., Bud'ko N.I., Kapustina O.V., et al. Detection on the Intercosmos-24 satellite of VLF and ELF waves stimulated in the topside ionosphere by the heating facility "Sura" // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 1998. V. 60, N 12. P. 1261–1274.

Wagner L.S., Goldstain J.A., Lind R.W., et al. Channel probe observations of the auroral ionosphere during high-power auroral stimulation heating experiments // *Radio Sci.* 1990. V. 25, N 6. P. 1407–1422.

Wright D.M., Davies J.A., Robinson T.R., et al. Space plasma exploration by active radar (SPEAR): An overview of a future radar facility // *Ann. Geophys.* 2000. V. 18, N 9. P. 1248–1255.

Zabotin N.A., Bronin A.G., Zhibankov G.A., et al. On an anomalous attenuation of extraordinary waves in ionosphere heating experiments // *Radio Sci.* 2002. V. 37, N 6. 1102. DOI: 10.1029/2000RS002609.

REFERENCES

Afraimovich E.L., Astaf'eva E.I., Voeykov S.V. Generation of ionospheric irregularities by propagation of a solitary inner gravity wave during powerful magnetic storm on 2003, November 29–31. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2006, vol. 49, no. 2, pp. 89–104 (in Russian).

Aidakina N.A., Gushchin M.E., Zudin I.Y., Korobkov S.V., Kostrov A.V., Frolov V.L. Laboratory modeling and numerical simulation of whistler-mode waves propagation in a magnetoplasma with small-scale irregularities. Proc. XXIV All-Russia Scientific Conference "Radio Wave Propagation". Irkutsk, 2014, pp. 25–28 (in Russian).

Alebastrov V.A., Benediktov E.A., Ivanov V.N., Ignat'ev Yu.A., Savel'ev S.M., Terekhov A.S. Peculiarities of development and decay of an artificial ionospheric perturbation. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1984, vol. 27, no. 2, pp. 147–153 (in Russian).

Alimov V.A., Vybornov F.I., Myasnikov E.N., Rakhlin A.V., Frolov V.L. Magnetic zenith effect and some features of the multifractal structure of the small-scale artificial ionospheric turbulence. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2009, vol. 52, no. 9, pp. 679–689 (in Russian).

Allen E.M., Thome G.D., Rao P.B. HF phased array observations of heater-induced spread-F. *Radio Sci.* 1974, vol. 9, no. 11, pp. 905–916.

Avdeev V.B., Erukhimov L.M., Metelev S.A., Rakhlin A.V., Yarygin A.P. Radio sounding of small-scale artificial ionospheric turbulence. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1989, vol. 32, no. 2, pp. 251–252 (in Russian).

Bailey V.A. On some effects caused in the ionosphere by electric waves. *Phil. Mag.* 1937, vol. 23, p. 929.

Bailey V.A. Some possible effects caused by strong gyro waves in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1959, vol. 14, pp. 299–324.

Bakhmet'eva N.V., Goncharov N.P., Ignat'ev Yu.A., Korotina G.S., Tolmacheva A.V., Shavin P.B. Space-time characteristics of signals back-scattered from the ionosphere disturbed volume. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1989, vol. 29, no. 5, pp. 799–805 (in Russian).

Bakhmet'eva N.V., Ignat'ev Yu.A., Dmitriev S.A., Shavin P.B. Back-scattering radio waves from the ionosphere disturbed volume at a frequency of 1.68 MHz. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1992, vol. 32, no. 3, pp. 180–182 (in Russian).

Bakhmet'eva N.V., Belikovich V.V., Vyakhirev V.D., Frolov V.L., Kalinina E.E. Backscattering of radio waves by artificial irregularities of plasma in the lower ionosphere. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2010, vol. 53, no. 5–6, pp. 338–355 (in Russian).

Bakhmet'eva N.V., Frolov V.L., Vyakhirev V.D., Kalinina E.E., Bolotin I.A., Akchurin A.D., Zykov E.Yu. On formation of artificial plasma perturbations in the lower ionosphere. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2012, vol. 55, no. 1–2, pp. 106–121 (in Russian).

Belenov, A.F., Bubnov V.A., Erukhimov L.M., Kiselev Yu.V., Komrakov G.P., Mityakova E.E., Rubtsov L.N., Uryadov V.P., Frolov V.L., Chugunov Yu.V., Yukhmatov B.V. Parameters of artificial small-scale ionospheric. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1977, vol. 20, no. 12, pp. 1805–1813 (in Russian).

Belikovich V.V., Benediktov E.A., Getmantsev G.G., Erukhimov L.M., Zuikov N.A., Komrakov G.P., Korobkov Yu.S., Kotik D.S., Mityakov N.A., Rapoport V.O., Sazonov Yu.A., Trakhtengertz V.Yu., Frolov V.L. Cherepovitsky V.A. Non-linear phenomena in the upper ionosphere. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [Physics. Uspekhi]. 1974, vol. 113, iss. 4, pp. 732–734 (in Russian).

Belikovich V.V., Benediktov E.A., Getmantsev G.G., Erukhimov L.M., Zuikov N.A., Komrakov G.P., Korobkov Yu.S., Mityakov N.A., Rapoport V.O., Trakhtengertz V.Yu., Frolov V.L. New results of investigations of nonlinear phenomena in the ionosphere. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1975, vol. 18, no. 4, pp. 516–526 (in Russian).

Belikovich V.V., Benediktov E.A., Getmantsev G.G., Mityakov N.A., Razin V.A., Teplykh A.I., Shavin P.B., Tomchinsky A.M. Diffraction of radiation of discrete radio source Cassiopeia A on artificial ionospheric irregularities. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1976, vol. 19, no. 12, pp. 1902–1905 (in Russian).

Belikovich V.V., Benediktov E.A., Tolmacheva A.V., Bakhmet'eva N.V. *Issledovanie ionosfery s pomoshch'yu iskusstvennykh periodicheskikh neodnorodnostei* [Investigation of the ionosphere by means of artificial periodical irregularities]. N. Novgorod, IAPh RAS Publ., 1999, 156 p.

Belikovich V.V., Grach S.M., Karashtin A.N., Kotik D.S., Tokarev Yu.V. The "Sura" facility: Study of the atmosphere

and space (a review). *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2007, vol. 50, no. 7, pp. 545–576 (in Russian).

Benediktov E.A., Goncharov N.P., Ignat'ev Yu.A., Matyugin S.N., Shavin P.B. Experimental results of investigation of parameters of the ionosphere disturbed volume induced in the upper and low ionosphere using the method of vertical sounding. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1984, vol. 27, no. 1, pp. 12–17 (in Russian).

Berezin I.V., Belyansky V.B., Bud'ko N.I. Vas'kov V.V., Dimant Ya.S., C Prokof'ev A.V., Ryzhov V.A. Diagnostics of processes of plasma oscillation excitation by high-power radio wave. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1991, vol. 31, no. 5, pp. 874–880 (in Russian).

Bernhardt P.A., Wong M., Huba J.D., et al. Optical remote sensing of the thermosphere with HF pumped artificial airglow. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, no. A5, pp. 10,657–10,671.

Blagoveshchenskaya N.F. *Geofizicheskie efekty aktivnykh vozddeistvii v okolozemnom kosmicheskom prostranstve* [Geophysical effects of active influences in near-Earth space]. St.-Peterburg, Gidrometeoizdat Publ., 2001, 287 p. (in Russian).

Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K., Rietveld M.T., Häggström I., Ivanova I.M. Plasma modifications induced by an X-mode HF heater wave in the high-latitude F region of the ionosphere. *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2013, vol. 105–106, pp. 231–244.

Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kosch M., Sergienko T., Brändström U., Yeoman T. K., Häggström I. Optical and ionospheric phenomena at EISCAT under continuous X-mode HF pumping. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, no. 12, p. 10483. DOI: 10.1002/2014JA020658.

Bogdan A.P., Gridin A.N., Levkov A.V. A decameter heating facility. *Vestnik Khar'kovskogo politekhnicheskogo instituta.* 1980, no. 170, pp. 44–47 (in Russian).

Boiko G.N., Vas'kov V.V., Golyan S.F. Gurevich A.V., Dimant Ya.S., Zyuzin V.A., Kim V.Yu., Komrakov G.P., Lobachevsky L.A., Migulin V.V., Mityakov N.A., Panchenko V.A., Polimatidi V.P., Ryzhov V.A. Artificial defocusing lens in the ionosphere. *Pis'ma v ZHETF* [J. Exp. Theor. Phys. Lett.]. 1984, vol. 39, iss. 11, pp. 533–536 (in Russian).

Boiko G.N., Vas'kov V.V., Golyan S.F., Gurevich A.V., Dimant Ya.S., Zyuzin V.A., Kim V.Yu., Komrakov G.P., Lobachevsky L.A., Migulin V.V., Mityakov N.A., Panchenko V.A., Polimatidi V.P., Ryzhov V.A., Shoya L.D. Investigation of radio wave defocusing in the ionosphere pumped by powerful radio waves. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1985, vol. 28, no. 8, pp. 960–971 (in Russian).

Boiko G.N., Erukhimov L.M., Frolov V.L. Excitation of small-scale irregularities near the pump wave reflection height. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1990, vol. 30, no. 6, pp. 998–1002 (in Russian).

Bolotin I.A., Frolov V.L., Akchurin A.D., Zykov E.Yu., Yusupov K.M. Diagnostics of artificial ionospheric irregularities using short sounding radio paths. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2012, vol. 55, no. 1–2, pp. 66–78 (in Russian).

Bowhill S.A. Satellite transmissions studies of spread-F produced by artificial heating of the ionosphere. *Radio Sci.* 1974, vol. 9, no. 11, pp. 975–986.

Bud'ko N.I., Vas'kov V.V., Komrakov G.P., Nasyrov A.M., Petukhova E.V. Peculiarities of excitation of small-scale irregularities in a resonance ionosphere plasma region by its oblique irradiation by a powerful radio wave. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1989, vol. 29, no. 6, pp. 973–980 (in Russian).

Carroll J.C., Violette E.J., Utlaut W.F. The Platteville high-power facility. *Radio Sci.* 1974, vol. 9, no. 11, pp. 889–894.

Chernogor L.F. Mechanisms for generating oscillations in the infrasound frequency range in the upper atmosphere by periodic high-power radio transmissions. *Radiofizika i Radi-*

astronomiya [Radiophysics and Radioastronomy]. 2012, vol. 17, no. 3, pp. 240–252 (in Russian).

Chernogor L.F. *Fizika moshchnogo radioizlucheniya v geokosmose* [Physics of high-power radio emission in the geocosmos]. Kharkov, 2014, 541 p.

Chernogor L.F., Frolov V.L. Traveling ionospheric disturbances generated by periodic plasma heating by powerful high-frequency radio emission. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2012, vol. 55, no. 1–2, pp. 14–35 (in Russian).

Chernogor L.F., Frolov V.L. Features of propagation of the acoustic-gravity waves generated by high-power periodic radiation. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2013a, vol. 56, no. 4, pp. 219–239 (in Russian).

Chernogor L.F., Frolov V.L. Features of the wave disturbances in the ionosphere during periodic heating of the plasma by the “SURA” radiation. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2013b, vol. 56, no. 5, pp. 307–321 (in Russian).

Chudnovskiy L.S., Golubkov M.G., Frolov V.L., et al. The fluctuation amplitude variation of navigation signals of GLONASS space satellites. IV International Conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety” (AIS-2014). Kaliningrad, Russia, 2014. Paper S-5.

Djuth F.T., Reinish B.W., Kitrosser D.F., Elder J.H., Snyder A.L., Sales G.S. Imaging HF-induced large-scale irregularities above HAARP. *Geoph. Res. Lett.* 2006, vol. 33, L04107. DOI: 10.1029/2005GL024536.

Erukhimov L.M., Mityakova E.E., Myasnikov E.N. Polyakov S.V., Rakhlin A.V., Sinel'nikov V.M. On artificial ionospheric irregularity spectra at different heights. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1977, vol. 20, pp. 1814–1820 (in Russian).

Erukhimov L.M., Komrakov G.P., Frolov V.L. On spectrum of the artificial small-scale ionospheric turbulence. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1980, vol. 20, no. 6, pp. 1112–1114 (in Russian).

Erukhimov L.M., Zyuzin V.A., Komrakov G.P. Metel'ev S.A., Mityakov N.A., Frolov V.L., Ionospheric plasma heating by powerful radio waves. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1982, vol. 25, no. 7, pp. 843–844 (in Russian).

Erukhimov L.M., Kovalev V.Ya., Kurakin E.P., Marchenko S.F., Metel'ev S.A., Rubtsov L.N., Frolov V.L. Results of the first experiments aimed at the excitation of artificial ionospheric turbulence by means of the “Gissar” heating facility. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1985, vol. 28, no. 5, pp. 662–664 (in Russian).

Erukhimov L.M., Metel'ev S.A., Myasnikov E.N., Mityakov N.A., Frolov V.L. Artificial ionospheric turbulence (a review) // *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1987, vol. 30, no. 2, pp. 208–225 (in Russian).

Filipp N.D., Blaunstein N.Sh., Erukhimov L.M., Ivanov V.A., Uryadov V.P. *Sovremennye metody issledovaniya dinamicheskikh protsessov v ionosphere* [Novel methods for studying dynamical processes in the ionosphere] Kischinev, SChTI-INTSA Publ., 1991, 287 p.

Frolov V.L. *Iskusstvennaya plasmennaya turbulentnost verkhnei ionosfery, vzbuzhdaemaya moshchnym KV-radioizlucheniem nazemnykh peredatchikov. Resul'taty eksperimental'nykh issledovaniy.* Dokt. Diss. [Artificial ionospheric turbulence in the upper ionosphere HF-induced by ground-located transmitters. Results of experimental studies. Doct. Diss.]. N. Novgorod, 1996. 419 p.

Frolov V.L., Erukhimov L.M., Metel'ev S.A., Sergeev E.N. Temporal behavior of artificial small-scale ionospheric irregularities: Review of experimental results. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997, vol. 59, no. 18, pp. 2317–2333.

Frolov V.L., Chugurin V.V., Komrakov G.P., Mityakov N.A., Myasnikov E.N., Rapoport V.O., Sergeev E.N., Uryadov V.P.,

Vybornov F.I., Ivanov V.A., Shumaev V.V., Nasyrov A.M., Nasyrov I.A., Groves K.M. Study of large-scale irregularities generated in the ionospheric F region by high-power HF waves. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2000, vol. 43, no. 6, pp. 479–519 (in Russian).

Frolov V.L., Sergeev E.N., Ermakova E.N., Komrakov G.P., Stubbe P. Spectral features of stimulated electromagnetic emissions, measured in the 4.3–9.5 MHz pump wave frequency range. *Geophys. Res. Lett.* 2001, vol. 28, no. 16, pp. 3103–3106.

Frolov V.L., Nedzvetsky D.I., Komrakov G.P. Features of excitation of stimulated electromagnetic emission of the ionosphere modified by an oblique high-power radio wave. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2005, vol. 48, no. 9, pp. 743–756 (in Russian).

Frolov V.L., Bakhmet'eva N.V., Belikovich V.V., Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Komrakov G.P., Kotik D.S., Mityakov N.A., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Sergeev E.N., Tereshchenko E.D., Tolmacheva A.V., Uryadov V.P., Khudukon B.Z. Modification of the terrestrial ionosphere by high-power short-wave radio radiation. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [Physics. Uspekhi]. 2007, vol. 177, no. 3, pp. 16–26 (in Russian).

Frolov V.L., Nedzvetsky D.I., Uryadov V.P., Ivanov V.A., Ivanov D.V., Lashchevsky A.R., Ryabova N.V. Gyroharmonic features of the middle-scale artificial ionospheric turbulence becoming apparent by F2 region heating by a high-power O-mode radio wave. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2008a, vol. 51, no. 5, pp. 367–375 (in Russian).

Frolov V.L., Rapoport V.O., Komrakov G.P., Belov A.S., Markov G.A., Parrot M., Rauch J.-L., Mishin E.V. Creation of a duct plasma density by Earth's ionosphere heating using high-power HF radio emission. *Pis'ma v ZHETF* [J. Exp. Theor. Phys. Lett.]. 2008b, vol. 88, iss. 12, pp. 908–913 (in Russian).

Frolov V.L., Rapoport V.O., Komrakov G.P., Belov A.S., Markov G.A., Parrot M., Rauch J.-L., Mishin E.V. Satellite measurements of plasma perturbations induced in the topside ionosphere by powerful HF radio waves from the SURA heating facility. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2008c, vol. 51, no. 11, pp. 915–934 (in Russian).

Frolov V.L., Komrakov G.P., Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Vasil'ev A.E., Kurbatov G.A. Sounding of the ionosphere disturbed by the SURA heating facility radiation using signals of the GPS navigation satellites. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2010, vol. 53, no. 7, pp. 421–444 (in Russian).

Frolov V.L., Bolotin I.A., Komrakov G.P., Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Vertogradov E.G., Akchurin A.D., Bochkarev V.V., Dresher A.M., Zykov E.Yu., Latypov R.R., Petrova I.R., Yusupov K.M., Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Kurbatov G.A. Gyroharmonic features of the irregularities HF-induced in the ionosphere. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2012, vol. 55, no. 6, pp. 393–420 (in Russian).

Frolov V.L., Mityakov N.A., Shorokhova E.A., Parrot M. Structure of the electric field of a high-power radio wave in the outer ionosphere. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2013, vol. 56, no. 6, pp. 613–381 (in Russian).

Frolov V.L., Bolotin I.A., Komrakov G.P., Pershin A.V., Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Vertogradov E.G., Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Kurbatov G.A., Akchurin A.D., Zykov E.Yu. Generation of artificial ionospheric irregularities in the Earth's midlatitude ionosphere affected by high-power high-frequency X-mode radio waves. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2014, vol. 57, no. 6, pp. 437–463 (in Russian).

Frolov V.L., Shorokhova E.A., Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Padokhin A.M. Peculiarities of excitation of large-scale plasma density irregularities by ionosphere F region modification using powerful HF radio waves. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2015a (in print) (in Russian).

Frolov V.L., Rapoport V.O., Shorokhova E.A., Aidakina N.A., Gushchin M.E., Zudin I.Yu., Korobkov S.V., Kostrov A.V., Parrot M., Rauch J.-L. Fine structure of density ducts formed by active radiofrequency action on laboratory and space plasmas. *Pis'ma v ZHETF* [J. Exp. Theor. Phys. Lett.]. 2015b, vol. 101, iss. 5, pp. 342–346 (in Russian).

Gdalevich G.L., Klos Z., Mikhailov Yu. M. Processes in the ionospheric plasma connected with heating, electric field excitation acceleration of particles (on evidence of satellite "Intercosmos-24"). *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2003, vol. 43, pp. 645–652 (in Russian).

Gershman B.N. An influence of travel disturbances on excitation of additional ionospheric irregularities in F region. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1989, vol. 32, no. 12, p. 1571 (in Russian).

Getmantsev G.G., Komrakov G.P., Korobkov Yu.S., Mironenko L.F., Mityakov N.A., Rapoport V.O., Trakhtengertz V.Yu., Frolov V.L., Cherepovitsky V.A. Some results of investigations of nonlinear phenomena in the F-layer of the ionosphere. *Pis'ma v ZHETF* [J. Exp. Theor. Phys. Lett.]. 1973, vol. 18, iss. 10, pp. 621–624 (in Russian).

Ginzburg V.L. *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln v plazme* [Propagation of electromagnetic waves in plasma]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 683 p. (in Russian).

Ginzburg V.L., Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in plasma. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [Physics. Uspekhi]. 1960, vol. 70, no. 2, pp. 201–246 and no. 3, pp. 393–428 (in Russian).

Gordon W.E. HAARP facility in Alaska. *Science*. 1997, vol. 275, no. 5308, p. 1861.

Gordon W.E., Carlson H.C., Showen R.L. Ionospheric heating at Arecibo: First tests. *J. Geophys. Res.* 1971, vol. 76, pp. 7808–7813.

Grach S.M., Mityakov N.A., Shvarz M.M. Great advance of plasma density at developed stage of the thermal parametric instability. *Geomagn. and Aeronom.* 1989, vol. 29, no. 4, pp. 590–596 (in Russian).

Grigoh'ev G.I. Traveling ionospheric disturbances arising as a result of powerful transmitter operation. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1975, vol. 18, no. 12, pp. 1801–1805 (in Russian).

Grigoh'ev G.I., Trakhtengerts V.Yu. Radiation of inner gravity waves by operation of powerful heating facility in a scheme of time modulation of ionospheric currents. *Geomagn. and Aeronom.* 1999, vol. 39, no. 6, pp. 90–94 (in Russian).

Gudin V.A., Deineko V.N., Ivanov V.N., Ignat'ev Yu.A., Terekhov A.S. Experimental diagnostics of artificial large-scale perturbations in the upper ionosphere by the method of the back oblique sounding. *Izv. vuzov. Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1990, vol. 33, no. 4, pp. 506–508 (in Russian).

Gurevich A.V. Propagation of a powerful electromagnetic wave in plasma. *Radiotekhnika and Electron.* 1956, vol. 1, no. 6, pp. 706–719 (in Russian).

Gurevich A.V. *Nonlinear phenomena in the ionosphere*. New York: Springer, 1978. 372 p. (in Russian).

Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [Physics. Uspekhi]. 2007, vol. 177, no. 11, pp. 1145–1177 (in Russian).

Gurevich A.V., Shvarzburg A.B. *Nelineinaya teoriya rasprostraneniya radiovoln v ionosphere* [The nonlinear theory of radio wave propagation in the ionosphere]. Moscow, Nauka, 1973. 272 p.

Gurevich A.V., Zybin K.P. Strong field aligned scattering of UHF radio waves in ionospheric modification. *Phys. Lett.* 2006, A 358, P. 159–165.

Gurevich A.V., Dimant Ya.S., Milikh G.M., Vas'kov V.V. Multiple acceleration of electrons in the regions of high-power radio wave reflection in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1985, vol. 47, no. 11, pp. 1057–1070.

Gurevich A., Hagfors T., Carlson H., Karashtin, A., Zybin, K. Self-oscillations and bunching of striations in ionospheric modifications. *Phys. Lett.* 1998, A. 239. P. 385–392.

- Gurevich A., Fremouw E., Secan J., Zybin K.P. Large-scale structuring of plasma density perturbations in ionospheric modifications. *Phys. Lett.* 2002a, A. 301. pp. 307–314.
- Gurevich A.V., Zybin K.P., Carlson H.C., Pedersen T. Magnetic zenith effect in ionospheric modifications. *Phys. Lett.* 2002b, A. 305. pp. 264–274.
- Gurevich A.V., Zybin K.P., Carlson H.C. The magnetic zenith effect. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2005, vol. 48, no. 9, pp. 772–787 (in Russian).
- Gushchin M.E., Korobkov S.V., Kostrov A.V., Strikovskiy A.V. Parametric generation of whistlers by the interaction of high-frequency wave beams with magnetized plasma. *Pis'ma v ZHETF* [J. Exp. Theor. Phys. Lett.]. 2008, vol. 88, iss. 11, pp. 834–838 (in Russian).
- Hedberg A., Derblom H., Thide B., Kopka H., Stubbe P. Observations of HF backscatter associated with heating experiment at Tromsø. *Radio Sci.* 1983. vol. 18, no. 6. pp. 840–850.
- Hibberd F.H. On the observation of ionospheric self-interaction. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1956. vol. 8, no. 2, pp. 120–122.
- Honary F., Robinson T.R., Wright D.M., Stocker A.J., Rietveld M.T. First direct observations of the reduced striations at pump frequencies close to the electron gyroharmonics. *Ann. Geophysicae.* 1999. vol. 17, no. 9. pp. 1235–1238.
- Huang C.-S., Miller C.A., Kelley M.C. Basic properties and gravity wave initiation of the midlatitude F region instability. *Radio Sci.* 199, vol. 29, no. 1. pp. 395–405.
- Hyssel D.L., Kelley M.C., Yampolski Y.M., Beley V., Koloskov A.V., Ponomarenko P.V., Tyrnov O. F. HF radar observations of decaying artificial field-aligned irregularities. *J. Geophys. Res.* 1996. vol. 101, no. A12. P. 26,981–26,993.
- Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1999, vol. 42, no. 7–8 (in Russian) (special issue).
- Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2005, vol. 48, no. 9 (in Russian) (special issue).
- Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2008, vol. 51, no. 11 (in Russian) (special issue).
- Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2012, vol. 55, no. 1–2 (in Russian) (special issue).
- J. Atmos. Terr. Phys.* 1982, vol. 44, no. 12 (special issue).
- J. Atmos. Terr. Phys.* 1985, vol. 47, no. 12 (special issue).
- J. Atmos. Terr. Phys.* 1997, vol. 59, no. 18 (special issue).
- J. Geophys. Res.* 1970, vol. 75, no. 31 (special issue).
- Kapustin I.N., Pertsovskiy R.A., Vasil'ev A.N., Smimov V.S., Raspopov O.M., Solov'eva L.E., Ul'yanchenko A.A., Arykov A.A., Galakhova N.V. Generation of radiation at combined frequencies in the aurora electro jet region. *Pis'ma v ZHETF* [J. Exp. Theor. Phys. Lett.]. 1977, vol. 25, no. 5, pp. 248–251 (in Russian).
- Karashin A.N., Mityakov N.A., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Yu. Excitation of the sound in the ionosphere modified by powerful radio waves. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1977, vol. 20, no. 5, pp. 787–788 (in Russian).
- Kelley M.C., Arce T.L., Salway J., Sulzer M., Armstrong T., Carter M., Duncan L. Density depletion at the 10-m scale induced by the Arecibo heater. *J. Geophys. Res.* 1995, vol. 100, no. A9, pp. 17,367–17,376.
- Koloskov A.V., Leyser T.B., Yampolski Yu.M., Beley V.S. HF pump-induced large scale radial drift of small scale magnetic field-aligned density striations. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A7, pp. 1726–1735. DOI: 10.1029/2001JA000154.
- Kopka H., Stubbe P., Jones T.B., Robinson T. Nonlinear reflectivity of high-power radio waves in the ionosphere. *Nature.* 1982, vol. 295, p. 680. DOI: 10.1038/295,680a0.
- Korovin A.V., Nasyrov A.M., Proskurin E.V., Yagnov N.N. Results of angular measurements at VHF scattering by artificial irregularities. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1981, vol. 24, no. 6, pp. 675–679 (in Russian).
- Kostin V.M., Romanovskiy Yu.A., Chmyrev V.M., Sinel'nikov V.M., Afonin V.V., Borisov N.D., Zyuzin V.A., Isaev N.V., Komrakov G.P., Mikhailov Yu.M., Ovcharenko O.E., Petrov M.S., Namazov S.A., Selegei V.V., Sobolev Ya.P., Trushkina E.P. Satellite investigation of the topside ionosphere disturbances resulted from intensive short radiowaves action at the F region of the ionosphere. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Research]. 1993, vol. 31, no. 1, pp. 84–92 (in Russian).
- Kulikov Yu.Yu., Frolov V.L., Grigor'ev G.I., Demkin V.M., Komrakov G.P., Krasil'nikov A.A., Ryskin V.G. Response of mesosphere ozone on the heating of the lower ionosphere by high-power HF radio emission. *Geomagn. and Aeronom.* 2013, vol. 1, no. 1, pp. 102–109. DOI: 10.7868/S0016794013010112 (in Russian).
- Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Vasiliev A.E., Kurbatov G.A., Frolov V.L., Komrakov G.P. Study of GNSS-measured Ionospheric Total Electron Content variations generated by powerful HF heating. *Adv. Space Res.* 2011, vol. 47, no. 10. pp. 1743–1749.
- Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Frolov V.L., Komrakov G.P., Nazarenko M.O., Padokhin A.M. Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigation satellite radio transmissions. *Radio Sci.* 2012, vol. 47, RS0L15. DOI: 10.1029/2011RS004957.
- Kuo S., Cheng W.-T., Snyder A., Kossey P., Battis J. Contracting O/X-mode heater effects on O-mode sounding echo and the generation of magnetic pulsations. *Geophys. Res. Lett.* 2010, vol. 37, L01101. DOI: 10.1029/2009GL041471.
- Leyser T.B. Stimulated electromagnetic emissions by high-frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma. *Space Sci. Rev.* 2001, vol. 98, no. 3–4. P. 223–328.
- Markov G.A., Belov A.S., Frolov V.L., Rapoport V.O., Parrot M. Excitation of the magnetosphere maser by influence of powerful HF radio waves, radiated by a ground based transmitter, on the Earth's ionosphere. *Zh. Experm. and Teoretich. Fiziki.* 2010, vol. 138, iss. 6(12), pp. 1037–1042 (in Russian).
- Milikh G., Gurevich A., Zybin K., and Secan J. Perturbations of GPE signals by the ionospheric irregularities generated due to HF-heating at triple of electron gyrofrequency. *Geophys. Res. Lett.* 2008, vol. 35, L22102. DOI: 10.1029/2008GL035527.
- Minkoff J. and Kreppel R. Spectral analysis and step response of radio frequency scattering from a heated ionospheric volume. *J. Geophys. Res.* 1976, vol. 81, no. 16. P. 2844–2856.
- Mishin E., Sutton E., Milikh G., Galkin I., Roth C., Förster M. F2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization streams. *Geophys. Res. Lett.* 2012. vol. 39, L11101. DOI: 10.1029/2012GL052004.
- Mityakov N.A., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Yu. Scattering O-mode wave from small-scale irregularities near its reflection level. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1975, vol. 18, no. 9, pp. 1273–1278 (in Russian).
- Mityakov N.A., Alimov V.A., Zinichev V.A., Komrakov G.P., Mityakov S.N. Study of small-scale turbulence in the ionospheric F layer by the method of back-scattering of short radio waves. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2010, vol. 53, no. 5–6, pp. 329–337 (in Russian).
- Myasnikov E.N. *Kvazistaticheskaya turbulentnost plazmy verkhnei ionosfery pri iskusstvennykh i estestvennykh vozmushcheniyakh*. Dokt. Diss. [Quasi-static plasma turbulence in the upper ionosphere induced by artificial and natural perturbations. Doct. Diss]. N. Novgorod, 2007. 297 p. (in Russian).
- Myasnikov E.N., Murav'eva N.V. Characteristics of the spatial spectrum of plasma irregularities excited at the mid-latitudes by the high-power “SURA” facility. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.], 2007, vol. 50, no. 8, pp. 722–730 (in Russian).
- Najmi A., Milikh G., Secan J., Chiang K., Psiaki M., Bernhardt P., Briczinski S., Siefiring C., Chang C.L., Papadopoulos K. Generation and detection of super small striations by F region HF heating. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119. DOI: 10.1002/2014JA020038.
- Nasyrov A.M. *Rasseyaniye radiovoln anizotropnyimi ionosfernymi neodnorodnostyami*. [Scattering of radio waves

from field-aligned ionospheric irregularities.]. Kazan, 1991. 149 p. (in Russian).

Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., Kendall E., Mills T., Carlson H.C., Snyder A.L. Creation of artificial ionospheric layers using high power HF waves. *Geophys. Res. Lett.* 2010, vol. 37, L02106. DOI: 10.1029/2009GL041895.

Planetary and Space Sci. 2006, vol. 54, no. 5. P. 409–557 (special issue).

Pope J.H., Fritz R.B. Observations of artificially produced scintillations using satellite transmissions. *J. Geophys. Res.* 1974, vol. 79, no. 7, pp. 1065–1067.

Pradipta R., Lee M.C., Cohen J.F., Watkins D.J. Generation of artificial acoustic-gravity waves and travelling ionospheric disturbances in HF heating experiments. *Earth, Moon, Planets.* 2015. DOI: 10.1007/s11038-015-9461-2.

Radio Sci. 1974, vol. 9, no. 11 (special issue).

Rapoport V.O., Frolov V.L., Komrakov G.P., Markov G.A., Belov A.S., Parrot M., Rauch J.-L. Some results of measuring the characteristics of electromagnetic and plasma perturbations induced in the outer ionosphere by the high-power short-wave emission of the “SURA” stand. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2007, vol. 50, no. 8, pp. 709–721 (in Russian).

Rapoport V.O., Frolov V.L., Polyakov S.V., Komrakov G.P., Ryzhov N.A., Markov G.A., Belov A.S., Parrot M., and Rauch J.-L. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A10322. DOI: 10.1029/2010JA015484.

Rietveld M.T., Kosch M.J., Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Leyser T.B., Yeoman T.K. Ionospheric electron heating, optical emissions, and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: Aspect angle dependence. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A4, 1141. DOI: 10.1029/2002JA009543.

Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by the high power radio waves. *Physics Rep.* 1989, vol. 179, no. 2–3, pp. 79–209.

Sciacchitano A. Phenomenon of the interaction of radio waves; the Luxemburg effect. *Scientia.* 1956, vol. 91, p. 206.

Sergeev E.N., Frolov V.L., Grach S.M., Kotov P.V. On the morphology of SEE spectral features in a wide pump wave frequency range. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 38, no. 11, pp. 2518–2526.

Shlyuger I.S. Self-modulation of powerful electromagnetic pulse reflected from upper ionospheric layers. *Pis'ma v ZHETF* [J. Exp. Theor. Phys. Lett.]. 1974, vol. 19, no. 5, pp. 247–251 (in Russian).

Stubbe P., Hagfors T. The Earth's ionosphere: A wall-less plasma laboratory. *Surveys in Geophysics.* 1997, vol. 18, no. 1, pp. 57–127.

Stubbe P., Kopka H., Dowden R.L. Generation of ELF and VLF waves by polar electrojet modulation: experimental results. *J. Geophys. Res.* 1981, vol. 86, no. A11, pp. 9073–9078.

Stubbe P., Kopka H., Lauche H., Rietveld M.T., Brekke A., Holt O., Jones T.B., Robinson T., Hedberg A., Thdee B., Crochet M., Lotz H.J. Ionospheric modification experiments in northern Scandinavia. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1982, vol. 44, no. 12, pp. 1025–1041.

Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Gurevich A.V., Zybin K.P., Frolov V.L., Myasnikov E.N., Muravieva N.V., Carlson H.C. Radio tomography and scintillation studies of ionospheric electron density modification caused by a powerful HF-wave and magnetic zenith effect at mid-latitudes. *Physics Lett.* 2004, A325. P. 381–388.

Tereshchenko E.D., Milichenko A.N., Frolov V.L., Yurik R.Yu. Observation of the magnetic-zenith effect using GPS/GLONASS satellite signals. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2008, vol. 51, no. 11, pp. 934–938 (in Russian).

Uryadov V.P., Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Komrakov G.P., Cherkashin Yu.N., Vas'kov V.V. Field-aligned scattering of HF radio waves under modification of the ionosphere by high-power oblique radio waves. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2007, vol. 50, no. 8, pp. 669–677 (in Russian).

Uryadov V.P., Vertogradov G.G., Ponyatov A.A., Vertogradov V.G., Kubatko S.V., Cherkashin Yu.N., Krasheninnikov I.V., Komrakov G.P., Valov V.A. Structure and dynamics of the ionospheric region with artificial small-scale irregularities according to complex measurements of the scattered radio-signal characteristics. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2008, vol. 51, no. 12, pp. 1011–1025 (in Russian).

Utlaut W.F. An ionospheric modification experiment using very high power, high frequency transmission. *J. Geophys. Res.* 1970, vol. 75, no. 31, pp. 6402–6405.

Utlaut W.F., Cohen R. Ionosphere modification under the action of high-power radio waves. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk.* [Physics. Uspekhi]. 1973, vol. 109, no. 2, pp. 371–373 (in Russian).

Utlaut W.F., Violette E.J. A summary of vertical incidence radio observations of ionospheric modification. *Radio Sci.* 1974, vol. 9, no. 11, pp. 895–903.

Vas'kov V.V., Dimant Ya.S. An influence of plasma density profile deformation on high-power wave anomalous absorption. *Geomagn. and Aeronom.* 1989, vol. 29, no. 3, pp. 417–422 (in Russian).

Vas'kov V.V., Gurevich A.V., Dimant Ya.S. Large-scale plasmastratification as a result of ionosphere disturbance by a high-power radio wave. *Geomagn. and Aeronom.*, 1981a, vol. 21, no. 5, pp. 809–815 (in Russian).

Vas'kov V.V., Gurevich A.V., Karashtin A.N. Thermal self-focusing instability of plasma waves in a resonance region. *Geomagn. and Aeronom.*, 1981b, vol. 21, no. 6, pp. 973–980 (in Russian).

Vas'kov V.V., Golyan S.F., Gurevich A.V., Zyuzin V.A., Kim V.Yu., Komrakov G.P., Lobachevsky L.A., Migulin V.V., Mityakov N.A., Panchenko V.A., Polimatidi V.P. Excitation of upper hybrid resonance in the ionospheric plasma by high-power radio waves. *Pis'ma v ZHETF* [J. Exp. Theor. Phys. Lett.]. 1986, vol. 43, iss. 11, pp. 512–515 (in Russian).

Vas'kov V.V., Komrakov G.P., Oraevsky V.N., Pruten-sky I.S., Pulnits S.A., Kiraga A., Klos Z. Excitation of plasma noises by F layer ionosphere heating using high-power radio waves, according to satellite “APEX” data. *Geomagn. and Aeronom.* 1995, vol. 35, no. 1, pp. 154–158 (in Russian).

Vas'kov V.V., Bud'ko N.I., Kapustina O.V., Mikhailova Yu.M., Ryabova N.A., Gdalevich G.L., Komrakov G.P., Maresov A.N. Detection on the Intercosmos-24 satellite of VLF and ELF waves stimulated in the topside ionosphere by the heating facility “Sura”. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 1998, vol. 60, no. 12, pp. 1261–1274.

Vertogradov G.G., Vertogradova E.G., Uryadov V.P., Vertogradov V.G., Komrakov G.P., Krasheninnikov I.V., Cherkashin Yu.N., Valov V.A., Bredikhin D.V., Makarov A.V. Cluster structure of artificial ionospheric turbulence according to the data of the radar measurements by the radio-direction finder ionosonde. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 2012, vol. 55, no. 1–2, pp. 1–13 (in Russian).

Vilensky I.M. On an influence of medium nonlinearity on a radio wave propagating in the ionosphere. *Doklady Akademii Nauk SSSR.* 1953, vol. 92, pp. 525–527 (in Russian).

Vilensky I.M. On a nonlinear effect taking place by radio wave propagation in the ionosphere. *Doklady Akademii Nauk SSSR.* 1970, vol. 191, no. 5, pp. 1041–1043 (in Russian).

Vybornov F.I., Erukhimov L.M., Komrakov G.P., Kosolapenko V.I., Kryazhev V.A., Myasnikov E.N. The measurements of amplitude oscillations spectra of satellite signals by modification of the ionosphere by high-power radio emission.

Izv. vuzov Radiofizika [Radiophys. Quant. Electr.]. 1986, vol. 29, no. 4, pp. 491–494 (in Russian).

Wagner L.S., Goldstain J.A., Lind R.W., Wong A.Y., McCarrick M.J. Channel probe observations of the auroral ionosphere during high-power aurora stimulation heating experiments. *Radio Sci.* 1990, vol. 25, no. 6, pp. 1407–1422.

Wright D.M., Davies J.A., Robinson T.R., Chapman P.J., Yeoman T.K., Thomas E.C., Lester M., Cowley S.W.H., Stocker A.J., Horne R.B., Honary F. Space Plasma Exploration by Active Radar (SPEAR): An overview of a future radar facility. *Ann. Geophysicae.* 2000, vol. 18, no. 9, pp. 1248–1255.

Zabotin N.A., Bronin A.G., Zhabankov G.A., Frolov V.L., Komrakov G.P., Mityakov N.A., Sergeev E.N. On an anomalous attenuation of extraordinary waves in ionosphere heating experiments. *Radio Sci.* 2002, vol. 37, no. 6, 1102. DOI: 10.1029/2000RS002609.

Zyuzin V.A., Komrakov G.P., Nasyrov A.M., Strekalov V.A. Characteristics of field-aligned scattering by an influence of powerful radio waves on the ionosphere. *Izv. vuzov Radiofizika* [Radiophys. Quant. Electr.]. 1988, vol. 31, no. 5, pp. 622–624 (in Russian).