УДК 533.951+537.868

ГЕНЕРАЦИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СРЕДНЕШИРОТНУЮ ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ МОЩНЫМИ КОРОТКИМИ РАДИОВОЛНАМИ С НЕОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

В. Л. Фролов ^{1,2} *, И. А. Болотин ¹, Г. П. Комраков ¹, А. В. Першин ¹, Г. Г. Вертоградов ³, В. Г. Вертоградов ³, Е. Г. Вертоградова ³, В. Е. Куницын ⁴, А. М. Падохин ⁴, Г. А. Курбатов ⁴, А. Д. Акчурин ², Е. Ю. Зыков ²

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

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань;

³ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону;

⁴ Московский государственный университет, г. Москва, Россия

Рассматриваются свойства искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых в F_2 области ионосферы при её модификации мощными короткими радиоволнами с необыкновенной поляризацией. Показано, что в среднеширотной ионосфере мелкомасштабные (декаметровые) неоднородности не генерируются. Интенсивность неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50$ м÷3 км оказывается в несколько раз слабее по сравнению со случаем, когда неоднородности возбуждаются мощными радиоволнами обыкновенной поляризации; интенсивность более крупномасштабных неоднородностей ослабляется ещё сильнее. Обнаружено, что на краю диаграммы направленности пучка мощных радиоволн имеет место усиление генерации крупномасштабных ($l_{\perp} \approx 5\div10$ км) искусственных ионосферных неоднородностей.

ВВЕДЕНИЕ

Уже в первых экспериментах по воздействию на ионосферную плазму мощным коротковолновым радиоизлучением специально построенных нагревных стендов было обнаружено, что наиболее сильные эффекты наблюдаются, когда для её модификации используются электромагнитные волны с обыкновенной (О) поляризацией, излучаемые вертикально или почти вертикально вверх [1, 2]. Это связано с тем, что возможно взаимодействие мощных радиоволн О-поляризации с плазмой в областях плазменных резонансов (далее резонансное взаимодействие), которое приводит, в конечном итоге, к генерации интенсивной искусственной ионосферной турбулентности вблизи уровня отражения мощной радиоволны [3]. Поскольку волны необыкновенной (X) поляризации отражаются ниже уровня плазменных резонансов, их воздействие на ионосферу, как обычно считалось, ограничивается омическим нагревом плазмы [4], развитием самофокусировочной неустойчивости, приводящей к генерации искусственных ионосферных неоднородностей концентрации плазмы с масштабам
и $l_\perp\approx 0,5$ км (l_\perp — поперечный по отношению к геомагнитному полю масштаб неоднородностей) [5], и формированием решётки концентрации плазмы в поле стоячей волны, образованной падающей и отражённой от ионосферы мощными электромагнитными волнами [6]. Ранее предполагалось, что все эти эффекты вызывают лишь достаточно слабые плазменные возмущения.

В связи с этим задачи модификации ионосферы мощными радиоволнами X-поляризации долгое время оставались без должного внимания, а получаемые результаты подробно не анализировались. Однако выполненные в 1993–1995 годах эксперименты с дополнительным нагревом

^{*} frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru

ионосферной плазмы мощными волнами X-поляризации показали, что включение такого нагрева значительно ослабляет интенсивность искусственной турбулентности, возбуждаемой мощной волной О-поляризации [7]. Ряд полученных в [7] результатов не мог быть объяснён в рамках существующих в то время представлений о взаимодействии мощных коротких радиоволн с ионосферной плазмой. В последнее время нагреву ионосферы мощными радиоволнами X-поляризации стало уделяться более пристальное внимание, и здесь был выполнен ряд целенаправленных экспериментальных исследований. К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал, который ещё требует своего анализа и обобщения, а в ряде случаев — проведения дополнительных исследований.

Целью данной работы является изучение воздействия мощных коротких радиоволн Х-поляризации на среднеширотную ионосферу Земли, определение механизмов нерезонансного взаимодействия мощных радиоволн с магнитоактивной плазмой и особенностей генерации искусственных неоднородностей с различными масштабами. Результаты такого рода исследований также позволят более полно представить некоторые особенности резонансного взаимодействия плазмы и волн О-поляризации, которые обычно используются в экспериментах по модификации ионосферы.

Во второй части работы мы кратко рассмотрим результаты ранее выполненных исследований [8] свойств искусственной ионосферной турбулентности, возбуждаемой при модификации ионосферной плазмы мощными радиоволнами Х-поляризации. В третьем разделе представлены используемые в наших экспериментах методы регистрации искусственных неоднородностей с различными масштабами, генерация которых наблюдается при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации. Четвёртый раздел посвящён рассмотрению результатов ряда экспериментов, выполненных в последние 5 лет на стенде «Сура». В этих экспериментах для модификации ионосферы использовались мощные радиоволны Х-поляризации, излучаемые в вертикальном или в близком к вертикальному направлении. Итоги выполненных исследований и заключительные замечания сформулированы в последней части работы.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАНЕЕ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ МОЩНЫМИ РАДИОВОЛНАМИ Х-ПОЛЯРИЗАЦИИ

Анализ ранее выполненных исследований (см., например, работу [8] и цитируемую там литературу) позволяет заключить следующее. Модификация ионосферы мощными ($P_{\rm abb} \approx 100~{
m MBt}$) радиоволнами Х-поляризации характеризуется различного рода эффектами, характерные времена развития которых изменяются в широких пределах от десятков микросекунд до десятков минут. Некоторые из этих эффектов были интерпретированы согласно имеющимся экспериментальным данным. В первую очередь, это касается омического нагрева ионосферной плазмы мощными короткими радиоволнами в пределах диаграммы направленности их излучения [3, 4, 9–12]. В результате этого нагрева формируются искусственные периодические неоднородности в *D*-и *E*областях ионосферы [6] (характерные времена развития $0,1\div 2,0$ с), область с относительным увеличением концентрации плазмы до $10 \div 20\%$ (дефокусирующая линза) на высотах $130 \div 150$ км [13] (характерные времена порядка 30 с), область с дефицитом концентрации плазмы до нескольких процентов (фокусирующая линза) на высотах F₂-области [10, 13] (характерные времена порядка 3÷10 мин). Искусственные периодические неоднородности в *F*-области ионосферы формируются за счёт стрикционного выдавливания плазмы из пучностей поля электромагнитной волны [6] (характерные времена $0,1\div0,2$ с). Рост температуры электронов в возмущённой области ионосферы может повлиять на развитие плазменных неустойчивостей и, следовательно, на генерацию и

свойства различных компонент искусственной ионосферной турбулентности, возбуждаемых мощными радиоволнами О-поляризации.

В результате развития самофокусировочной неустойчивости [5, 14] нагрев ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации также приводит к генерации среднемасштабных искусственных ионосферных неоднородностей ($l_{\perp} \approx 0,1\div1,0$ км, характерные времена развития $0,5\div2,0$ мин). Эти неоднородности вызывают появление *F*-рассеяния на ионограммах [1, 15, 16], рассеяние коротких радиоволн [17], а также изменяют структуру электромагнитных полей внутри возмущённой области ионосферы за счёт, например, появления многолучёвости [16]. Свойства плазменной турбулентности, развивающейся в возмущённой области ионосферы под воздействием всех этих факторов, определяют влияние нагрева волнами Х-поляризации на изменение начального состояния ионосферы (и на развивающуюся искусственную ионосферную турбулентность соответственно), а также на появление разного рода эффектов последействия этого нагрева [7, 18]. Следует иметь в виду, что развитие интенсивной искусственной ионосферной турбулентности при модификации плазмы О-волнами, как правило, маскирует проявление более слабой турбулентности, возбуждаемой Х-волнами.

Попытки обнаружить генерацию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей ($l_{\perp} \approx 1 \div 20$ м) при модификации F_2 -области ионосферы предпринимались неоднократно. Эксперименты выполнялись на среднеширотном стенде «Боулдер» (Колорадо, США) [19, 20] и на высокоширотном нагревном стенде EISCAT (Тромсё, Норвегия) [21]. Эти эксперименты продемонстрировали отсутствие генерации мелкомасштабных неоднородностей при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации. Однако в последние годы в экспериментах на нагревном стенде EISCAT при модификации авроральной ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации была обнаружена генерация сильно вытянутых вдоль геомагнитного поля искусственных неоднородностей декаметровых масштабов [22–24]. В отличие от ранее выполненных экспериментов, эксперименты [22–24] проводились в поздние вечерние часы, когда мощная радиоволна Х-поляризации отражалась вблизи максимума F_2 -слоя ионосферы. При этом частота также излучаемой волны О-поляризации с меньшей интенсивностью (из-за неидеальности развязки по поляризациям) на 0,5 МГц и больше превышала критическую частоту f_{0F_2} , и О-волна не отражалась в ионосфере и не могла вызвать генерацию мелкомасштабных неоднородностей за счёт развития параметрических неустойчивостей.

В этих измерениях было зарегистрировано появление сильного рассеяния на искусственных неоднородностях с декаметровыми масштабами через 1÷3 мин после начала воздействия на ионосферу мощной радиоволной Х-поляризации. Это рассеяние по интенсивности было сравнимо с рассеянием, наблюдаемым при нагреве волнами О-поляризации. Важной особенностью этого рассеяния является необычно длительное (до 20÷30 мин) время его релаксации, что намного превышает характерное время релаксации (порядка 5÷15 с) для ракурсного рассеяния на таких неоднородностях при нагреве ионосферы волнами О-поляризации. Появление этого рассеяния регистрировалось только при больши́х мощностях волны накачки $P_{эфф} \ge 100$ МВт и только в условиях её отражения вблизи максимума F_2 -слоя ионосферы [22–24]. Полученные в этих экспериментах результаты говорят о том, что механизм генерации декаметровых неоднородностей должен быть связан с нагревом плазмы в пределах диаграммы направленности передающей антенны стенда.

Помимо омического нагрева мощными волнами X-поляризации и их самофокусировки, в литературе в последнее время стали рассматриваться и другие механизмы возможного их взаимодействия с ионосферной плазмой. Например, в работе [25] проанализирован процесс индуцированного рассеяния мощной радиоволны X-поляризации на ионах плазмы с возбуждением в ней электронно-циклотронных или верхнегибридных колебаний. Показано, что для частот волны на-

В. Л. Фролов, И. А. Болотин, Г. П. Комраков и др.

качки, находящихся между гармониками электронной гирочастоты, величина порогового поля развития неустойчивости минимальна вблизи уровня отражения мощной радиоволны. В F_2 -слое ионосферы она составляет примерно 1 В/м. Достижение таких полей в нагревных экспериментах (с учётом «разбухания» электрического поля мощной радиоволны вблизи точки её отражения [4]) возможно при мощностях волны накачки $P_{\rm эфф} \ge 50$ МВт, что меньше максимальных мощностей излучения действующих нагревных стендов «Сура», EISCAT и HAARP.

Если декаметровые неоднородности располагаются внутри более крупномасштабных плазменных образований, то их поддержание на стадии релаксации после выключения нагрева ионосферы возможно за счёт неустойчивости лоренцевого типа, как это рассматривалось в работе [26].

В последние годы стали активно обсуждаться возможности влияния модификации плазмы в пределах диаграммы направленности мощного радиоизлучения на процессы в возмущённой области ионосферы. В основе этого явления лежит неустойчивость, в результате развития которой одновременно генерируются флуктуации геомагнитного поля и крупномасштабные неоднородности концентрации плазмы под воздействием силы теплового давления разогретых полем мощной радиоволны электронов плазмы. В англоязычной литературе эта неустойчивость известна как «filamentation instability» [27]. Разогрев электронов приводит к их выталкиванию из центра пучка, где их температура выше. При этом электроны приобретают гидродинамическую скорость, пропорциональную [$\nabla T_e \times \mathbf{H}_0$] (T_e — электронная температура и \mathbf{H}_0 — напряжённость геомагнитного поля), что приводит к появлению кольцевого тока по границе пучка в перпендикулярной к внешнему магнитному полю плоскости. Похожий процесс с генерацией токов имеет место и при развитии крупномасштабных неоднородностей концентрации плазмы, электроны в которых разогреваются полем мощной радиоволны.

В работе [28] было показано, что наличие вариаций температуры в неоднородной плазме приводит к генерации магнитных полей, напряжённость которых пропорциональна произведению градиента концентрации и градиента температуры, что позволяет рассматривать периодически нагреваемую область ионосферы как антенну, излучающую волны в ОНЧ или УНЧ диапазоне.

Приведённые в [27–31] экспериментальные данные и теоретические расчёты показывают, что модификация плазмы пучком мощных радиоволн через тепловое давление или стрикционное (пондеромоторное) взаимодействие способна приводить к генерации соленоидальных токов. Последние сами по себе могут возмущать плазму через различного рода токовые неустойчивости, как генерируя искусственную ионосферную турбулентность, так и изменяя характеристики уже существующих плазменных возмущений. С этим механизмом могут быть связаны больши́е (10÷30 мин) времена релаксации декаметровых неоднородностей при нагреве F_2 -области ионосферы волнами Х-поляризации, наблюдавшиеся в экспериментах [22–24], а также часто наблюдающиеся больши́е времена последействия предыдущих циклов нагрева. Возможно, с этим также связано влияние модификации F_2 -области на характер развития турбулентности в нижней ионосфере [32].

Как видно из представленных выше данных, модификация мощными радиоволнами X-поляризации сложным образом влияет на ионосферу, и многие аспекты (включая механизмы генерации неоднородностей с различными масштабами) всё ещё остаются слабо изученными. Поэтому такого рода исследования представляют большой интерес.

2. МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ МАСШТАБАМИ

Для диагностики искусственных ионосферных неоднородностей с поперечными к геомагнитному полю масштабами l_{\perp} от десятков метров до десятков километров использовались различные

методы регистрации. Характеристики неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 10 \div 20$ м исследовались с помощью метода ракурсного (брэгговского) рассеяния коротких радиоволн. Приёмный пункт рассеянных сигналов размещался около г. Ростов-на-Дону на базе ЮФУ. В качестве зондирующих возмущённую область ионосферы радиоволн использовались сигналы станции точного времени PBM (Москва) на частотах 9 996 и 14 996 кГц, а также сигналы радиовещательных станций в диапазоне 15÷22 МГц. Эти измерения позволяют определять амплитуду рассевающих декаметровых неоднородностей, возбуждаемых в *F*-слое ионосферы при модификации его мощным радиоизлучением, характерные времена их развития и релаксации, направление и скорость дрейфа неоднородностей, суточные характеристики сигналов ракурсного рассеяния, а также изучать структуру рассеивающей области. Примеры таких измерений можно найти, например, в работах [33–36].

Для измерения характеристик неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м в последние годы в экспериментах на стенде «Сура» широко используется зондирование возмущённой области ионосферы с помощью модифицированного ионозонда «Циклон», работающего вблизи г. Казань. Расстояние от ионозонда до стенда «Сура» составляет 170 км. Особенностью этого ионозонда является его способность работать в комбинированном режиме, когда в паузе между съёмом ионограмм он переводится в режим импульсного излучения последовательно на 10 частотах с периодичностью излучения на каждой частоте 0,5 с. Ионограммы и результаты зондирования на фиксированных частотах регистрируются в цифровом виде. Последующая обработка полученных цифровых ионограмм позволяет определять интенсивность принимаемых сигналов (как отражённого от ионосферы, так и рассеянного) с их усреднением в выбранном высотно-частотном диапазоне.

Как показали выполненные измерения и расчёты траекторий лучей [37, 38], рассеянные сигналы могут быть зарегистрированы из широкой области высот (от высот Е-слоя до высот максимума F_2 -слоя) в области частот от 1,4 до 7,5 МГц для обеих поляризаций зондирующего сигнала. При зондировании возмущённой области на таких низких частотах важную роль играют эффекты рефракции радиоволн в ионосфере, которые сильно влияют на возможность выполнения условий брэгговского рассеяния. Следует также принимать во внимание, что рассеянные сигналы от F-области ионосферы (особенно на частотах ниже 4 \div 5 МГц) могут наблюдаться только в отсутствие мощных спорадических Е-слоёв, появление которых приводит к экранировке возмущённой области на высотах больше 100÷120 км. Согласно работе [37], в дневные часы рассеяние наблюдалось не всегда и только на частотах выше 4 МГц; при переходе к вечерним и поздним вечерним часам наблюдений рассеяние занимало всё более широкую полосу частот, нижняя граница которой опускалась вниз до 1,4÷2,0 МГц, и становилось более интенсивным. Последнее естественно связывать с суточными изменениями поглощения радиоволн средневолнового и коротковолнового диапазонов в нижней ионосфере (в областях D и E), которое определяет интенсивность прошедшей вверх мощной радиоволны и, следовательно, амплитуду возбуждаемых искусственных неоднородностей. Также имеет большое значение изменение величины рефракции радиоволн в нижних слоях ионосферы Земли.

В последнее время широко развивается метод зондирования возмущённой области радиосигналами навигационных спутников систем GPS и ГЛОНАСС на частотах 1,2÷1,6 ГГц. Приём сигналов этих спутников осуществляется с помощью развёрнутого на территории стенда «Сура» двухчастотного приёмника «Javad Lexon». Частота дискретизации при регистрации данных, как правило, составляет 10 Гц. В случае GPS для анализа берутся фазовые данные, получаемые на обеих частотах сигналов (1575,42 МГц, канал L1, и 1227,6 МГц, канал L2), которые используются для вычисления относительного полного электронного содержания (ПЭС) по наклонному лучу спутник—приёмник. Из полученных временны́х рядов ПЭС с использованием метода скользяще-

го среднего удаляется средний тренд. После этого характеристики выделенных вариаций ПЭС с удалённым трендом изучаются с помощью вейвлет-анализа с целью выявления в них периодических вариаций ПЭС и времени их существования, а также соответствия временны́х вариаций характеристик принятых сигналов режиму работы стенда «Сура». Подробно методики работы с сигналами и особенности анализа получаемых результатов изложены в работах [39–41].

Зондирование возмущённой области ионосферы радиосигналами навигационных спутников систем GPS и ГЛОНАСС позволяет получать данные об изменениях концентрации плазмы при модификации ионосферы, изучать характеристики развития километровых неоднородностей в различных частях возмущённой области ионосферы и, в частности, особенности их генерации в области магнитного зенита.

Важную роль в проводимых исследованиях играет зондирование ионосферы с помощью сигналов ионосферной станции, расположенной непосредственно на стенде «Сура». Помимо определения критических частот и высотного профиля концентрации ионосферной плазмы, такие измерения дают возможность контролировать уровень взаимодействия мощной радиоволны с плазмой, например, по развитию F-рассеяния, появление которого на ионограммах связано с рассеянием зондирующего сигнала на искусственных ионосферных неоднородностях с масштабами от сотен метров до нескольких километров. Этот метод является традиционным и практически всегда используется в нагревных экспериментах. Как показали исследования [1], F-рассеяние на ионограммах образуется не только при модификации ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации (в этом случае вблизи уровня их отражения имеет место интенсивное взаимодействие мощных радиоволн с плазмой и развитие интенсивной искусственной ионосферной турбулентности), но и при использовании мощных радиоволн Х-поляризации. Кроме того, ионограммы вертикального зондирования позволяют контролировать появление спорадического слоя E, который может заметно повлиять как на модификацию ионосферы, так и на зондирование искусственных неоднородностей методом ракурсного рассеяния. Учёт такого влияния важен при интерпретации получаемых экспериментальных данных.

В заключение заметим, что периодическое воздействие мощными радиоволнами Х-поляризации на ионосферу Земли может вызывать генерацию перемещающихся ионосферных возмущений, пространственные масштабы которых составляют сотни километров. По своим свойствам они соответствуют распространению внутренних гравитационных волн на ионосферных высотах. В экспериментах на стенде «Сура» эти возмущения диагностируются, например, с помощью доплеровского радара вертикального зондирования ионосферы, расположенного около г. Харькова (Украина). Детальное описание радара и методов обработки принимаемых сигналов, а также полученные результаты представлены в работах [42–44]. Следует отметить, что с точки зрения эффективности возбуждения перемещающихся ионосферных возмущений волны Х-поляризации существенно уступают волнам О-поляризации [43], и в настоящей работе мы не будем останавливаться на анализе полученных здесь результатов.

Таким образом, используемые в наших экспериментах методы диагностики искусственных ионосферных неоднородностей охватывают широкий диапазон их масштабов от десятка метров до сотни километров. Они позволяют определять особенности их генерации и, следовательно, изучать механизмы взаимодействия мощных радиоволн Х-поляризации с ионосферой Земли. Кроме того, некоторые результаты исследований могут быть перенесены и на модификацию ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КОРОТКИМИ РАДИОВОЛНАМИ Х-ПОЛЯРИЗАЦИИ

После обнаружения генерации декаметровых неоднородностей при модификации авроральной ионосферы мощными радиоволнами X-поляризации [22–24] стала очевидна необходимость новых более детальных исследований генерации искусственных неоднородностей с различными масштабами с целью изучения механизмов развития турбулентности плазмы верхней ионосферы Земли под воздействием этих волн. При этом исследования, выполняемые в среднеширотной ионосфере, отличаются тем, что здесь, как правило, отсутствует характерный для высоких широт достаточно высокий уровень естественной возмущённости ионосферы, особенно в периоды повышенной геомагнитной активности.

Эксперименты по воздействию на F_2 -область ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации с использованием приведённых в разделе 2 различных методов диагностики возникающих возмущений проводились на стенде «Сура» в августе 2008 года, в марте и сентябре 2009 года, в марте и августе 2010 года, в марте, августе и сентябре 2011 года, в марте, августе и сентябре 2012 и в сентябре 2013 годов в условиях дневной, вечерней и ночной ионосферы. В большинстве случаев частота мощной радиоволны не превышала 5,8 МГц, в поздние вечерние и ночные часы она, как правило, была равна 4,3 МГц. Уровень геомагнитной возмущённости во время этих измерений был немного выше среднего 26–29 сентября 2011 года (суммарный за сутки геомагнитный индекс $\Sigma K_p = 25 \div 32$) и 2–4 сентября 2012 года ($\Sigma K_p = 23 \div 33$); в остальные дни измерений геомагнитная активность была низкой ($\Sigma K_p \leq 10$). За время этих экспериментов всего было проведено более 30 циклов нагрева ионосферы в разное время суток с длительностью от двух до четырёх часов. В каждом сеансе использовались различные режимы периодического излучения мощной радиоволны от 1 мин — излучение, 1 мин — пауза ([+1 мин; -1 мин]) до 30 мин — излучение, 30 мин — пауза ([+30 мин; -30 мин]).

Ниже мы рассмотрим результаты этих исследований, основываясь, главным образом, на результатах экспериментов, выполненных в сентябре 2011 года и в марте и августе 2012 года, в которых были проведены наиболее длинные циклы измерений и получены более полные наборы экспериментальных данных. Сразу следует отметить, что искусственные неоднородности при нагреве ионосферы волнами Х-поляризации регистрировались, главным образом, в вечерние и ночные часы. Они редко обнаруживались или совсем не регистрировались в утренние и дневные часы. Единственным исключением являлось образование области с избыточной концентрацией плазмы (дефокусирующей линзы) на высотах 130÷150 км, которая формируется только в дневных условиях при обеих поляризациях мощной радиоволны [13]. Такая линза хорошо обнаруживается с помощью GPS-зондирования возмущённой области (см., например, [39]).

3.1. Генерация мелкомасштабных неоднородностей $(l_{\perp} \leq 20 \,\,{ m M})$

Диагностика мелкомасштабных неоднородностей выполнялась методом ракурсного рассеяния коротких радиоволн на приёмном пункте, развёрнутом около г. Ростов-на-Дону. Выполненные измерения позволяют сделать следующие выводы.

Во-первых, при излучении мощных радиоволн Х-поляризации рассеянные сигналы (если они регистрировались) всегда имели малую интенсивность, намного уступающую интенсивности сигнала при модификации ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации. Эти сигналы на-

блюдались только в вечернее и ночное время и далеко не во всех циклах работы стенда «Сура». Во-вторых, рассеянный сигнал имел времена релаксации около $10\div20$ с, соответствующие временам релаксации декаметровых искусственных неоднородностей, измеренным при модификации ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации. В-третьих, рассеянные сигналы пропадали, когда критическая частота для волны О-поляризации в F_2 -области ионосферы (f_{0F_2}) становилось меньше частоты мощной радиоволны Х-поляризации.

Всё это позволяет заключить, что наблюдаемые в наших экспериментах такие слабые рассеянные сигналы при модификации ионосферы волнами Х-поляризации являются следствием излучения вместе с Х-волной и О-волны (уровень относительной мощности которой не превышал 10%) из-за неидеальности конструкции передающих антенных систем стенда. Эффективная мощность этой сопутствующей О-волны даже при учёте поглощения в нижней ионосфере может достигать нескольких мегаватт на высотах F_2 -области, что в вечерних и ночных условиях оказывается достаточным, чтобы вызвать генерацию декаметровых неоднородностей с регистрируемой амплитудой [2, 3, 34].

3.2. Генерация неоднородностей с масштабами $l_\perp \approx 50 \div 200$ м

Эксперименты по изучению свойств таких неоднородностей выполнялись с помощью ионозонда, расположенного около г. Казань в 170 км к востоку от нагревного стенда «Сура». Как отмечалось выше, генерация неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50\div200$ м при модификации F_2 -области ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации хорошо обнаруживалась в вечерние и ночные часы, лишь в некоторых случаях в утренние часы и никогда в дневные часы наблюдений. Последнее связано с тем, что в дневных условиях имеет место максимальное поглощение радиоволн в нижних слоях ионосферы и формирование дефокусирующей линзы. Это приводит к значительному (более 20 дБ) уменьшению плотности потока мощного радиоизлучения на высоте его отражения в F_2 -слое ионосферы и, следовательно, к значительному уменьшению амплитуды возбуждаемых плазменных возмущений.

В качестве примера регистрации рассеяния при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации с помощью казанской ионосферной станции на рис. 1 представлена серия из 6 ионограмм, полученных во время сеанса 18:50÷21:20 MSK 30 сентября 2011 года. Нагрев ионосферы осуществлялся вертикальным пучком мощных радиоволн на частоте $f_{\rm x} = 5\,828$ кГц с мощностью $P_{9\phi\phi} \approx 130$ MBт в режиме [+20 мин; -20 мин] до 19:50 MSK и в режиме [+10 мин; -10мин] позднее. Критическая частота $f_{{\rm x}F_2}$ в районе стенда «Сура» была около 6,6 МГц в начале сеанса (рис. 1*a*), к концу измерений она постепенно уменьшилась до 5,6 МГц, став на 0,2 МГц ниже частоты волны накачки f_x (рис. 1d), когда модификация ионосферы выполнялась уже в условиях нагрева «на просвет». При этом около 19:40 MSK (см. рис. 16) была пройдена критическая частота f_{0F_2} ($f_x \approx f_{0F_2}$) и дальше сопутствующая О-волна уже не отражалась в ионосфере, для неё не выполнялось условие резонансного взаимодействия с плазмой, и поэтому она не могла возбудить искусственные неоднородности с заметной амплитудой. Условие, когда частота волны накачки f_x была только на 0,1 МГц ниже критической частоты f_{xF_2} , выполнялось около 20:46 MSK (рис. 1e); частота $f_{\rm x}$ была практически равна или была даже немного ниже частоты f_{xF_2} около 20:51 MSK (рис. 1*г*). На рис. 1*е* представлена ионограмма, снятая в одну из пауз воздействия через 6 мин после выключения волны накачки.

Из представленных на рис. 1 ионограмм хорошо видно, что пока выполняется условие $f_x \leq f_{xF_2}$, рассеянный сигнал обнаруживается во всей полосе частот зондирования: в диапазоне 2÷5 МГц на высотах 290÷330 км примерно на 50 км выше следа ионограммы вертикального зон-



Рис. 1. Серия ионограмм, полученных в сеансе 18:40÷21:10 MSK 30 сентября 2011 года с помощью ионозонда «Циклон» (Казань) при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации. Овалами на панели б отмечены области приёма рассеянных сигналов

дирования, в диапазоне 5,3÷6,4 МГц на высотах 350÷400 км как дополнительный след, отходящий от О-следа ионограммы, и в диапазоне 6÷7 МГц на высотах 360÷500 км как дополнительный след, отходящий от её Х-следа. Все эти области регистрации рассеянного сигнала помечены на рис. 16 тремя овалами. Интенсивность рассеянного сигнала не испытывает какого-либо заметно-

В. Л. Фролов, И. А. Болотин, Г. П. Комраков и др.

го изменения при переходе к условию $f_x > f_{oF_2}$. Интенсивность рассеяния постепенно нарастает при приближении частоты f_x к частоте f_{xF_2} в диапазоне частот 5,3÷7,0 МГц, при этом рассеяние исчезает на частотах 2÷5 МГц, для которых оно определяется наличием неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 100 \div 200$ м на высотах между слоями E и F_2 . Возможно это связано с изменением рефракционных условий или с увеличением расстояния от высоты отражения волны накачки до области генерации таких неоднородностей. В последнем случае это может привести к уменьшению эффективности генерации неоднородностей на таких высотах. Рассеяние перестаёт регистрироваться (интенсивность рассеяния с высот F_2 -области ионосферы резко уменьшается) при переходе к условиям, когда $f_x > f_{xF_2}$ (нагрев «на просвет»). Полученные результаты ясно указывают на то, что именно модификация ионосферы мощными радиоволнами X-поляризации вызывает генерацию искусственных неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м. Похожие выводы были получены ранее в работе [17]. Также необходимо подчеркнуть, что для генерации таких неоднородностей оказывается существенным выполнение условия отражения мощной радиоволны в F_2 -области ионосферы.

Сравнение амплитуд рассеянных сигналов, вычисленных по ионограммам, полученным в схожих условиях при модификации ионосферы мощными радиоволнами О- и Х-поляризаций, показывает, что интенсивность неоднородностей при нагреве Х-волнами только в 3÷5 раз меньше интенсивности при нагреве О-волнами.

Таким образом, можно считать установленным, что модификация вечерней и ночной F_2 области ионосферы мощными радиоволнами X-поляризации приводит к генерации достаточно интенсивных неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м. Характеристики этих неоднородностей свидетельствуют, что их генерация не была вызвана сопутствующим излучением волн О-поляризации, как это отмечалось в разделе 3.1 для мелкомасштабных неоднородностей. Отсюда также следует, что развитие мелкомасштабных (декаметровых и короче) неоднородностей не должно определять генерацию неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м.

3.3. Генерация искусственных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 0,3 \div 3,0$ км (по данным ионозонда CADI, работающего на стенде «Сура»)

Выполненные исследования по модификации *F*₂-слоя ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации позволяют сделать следующие выводы о генерации искусственного *F*-рассеяния.

В дневные (полуденные) часы наблюдений при низком уровне геомагнитной активности часто наблюдалось появление слабого (с шириной следа по частоте до $0,2\div0,3$ МГц) *F*-рассеяния, если мощность X-волны была не меньше $80\div100$ МВт и волна накачки отражалась на высотах, близких к максимуму F_2 -слоя ионосферы. Среднеквадратичное значение флуктуаций электронной концентрации в неоднородностях, вызывающих *F*-рассеяние (согласно [45], оно может быть оценено по ширине его следа *F*), в этом случае составляет не больше нескольких процентов. По полученным данным, релаксация диффузности проходила за $3\div5$ мин, при этом нагрева ионосферы в течение 5 мин не хватало для развития диффузности до её стационарного уровня. Как показали эксперименты, отражение мощной радиоволны X-поляризации вблизи максимума F_2 слоя ионосферы является необходимым условием для возбуждения *F*-рассеяния в любое время суток при используемых на стенде «Сура» мощностях волны накачки.

В утренние часы (до 09:00 MSK, когда в ионосфере ещё нет мощных *D*- и *E*-слоёв) появление диффузности регистрировалось более часто по сравнению с дневными измерениями, хотя она и в этих условиях была незначительна и не успевала развиваться за время модификации (5 мин).

В вечерние часы измерений (после 18:00 MSK, когда *D*- и *E*-слои становились слабыми) развитие диффузности наблюдалось регулярно, если частота мощной радиоволны была достаточно



Рис. 2. Серия ионограмм, полученных на стенде «Сура» в период 17:30÷18:00 UT 31 августа 2012 года при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации

близка к критической частоте F_2 -слоя ионосферы f_{xF_2} . При условии $f_{xF_2} - f_x \ge 2$ МГц, когда волна накачки отражалась на высотах нижней части F_2 -слоя, развития диффузности (или генерации искусственных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 0,3\div3,0$ км) не наблюдалось. На интервале времени до захода Солнца (примерно 20:00 MSK) интенсивность F-рассеяния (интенсивность соответствующих размеров искусственных неоднородностей) постепенно нарастала от слабого уровня до сильного с шириной следа по частоте до 1 МГц и больше. В это же время имел место и рост времени релаксации F-рассеяния от $3\div5$ мин до 10 мин и более. Поэтому в поздние вечерние часы длительности паузы в $10\div15$ мин в излучении мощной радиоволны уже не хватало для полной релаксации диффузности, и высокий уровень искусственных неоднородностей в возмущённой ионосфере сохранялся при выключенной волне накачки.

Оценки показывают, что в случае сильного F-рассеяния среднеквадратичная амплитуда флуктуаций электронной концентрации в неоднородностях могла достигать $10\div20\%$, что лишь немного меньше амплитуды флуктуаций концентрации плазмы при модификации ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации. Также при переходе от вечерних к поздним вечерним часам наблюдений время развития диффузности уменьшалось до нескольких минут вместе с уменьшением пороговых мощностей её генерации до $20\div30$ МВт. Следует заметить, что в условиях излучения «на просвет», когда частота мощной радиоволны была больше критической частоты f_{xF_2} , F-рассеяние либо не регистрировалось, либо его интенсивность была значительно ниже по сравнению с нагревом ионосферы в условиях отражения мощной X-волны.

Пример появления искусственной диффузности в вечерние часы измерений и её релаксации в паузу излучения приведены на рис. 2, на котором панели *a*–*г* отвечают времени 0,5, 3, 7 и 11 мин после выключения волны накачки соответственно (по техническим причинам ионограммы во время излучения мощной радиоволны не регистрировались). Видно, что в условиях измерений в поздние вечерние часы характерное время релаксации неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 0.3 \div 3.0$ км можно оценить как 5÷7 мин; при этом паузы с длительностью в 11 мин после окончания воздействия было недостаточно для полной релаксации диффузности.

Таким образом, выполненные исследования позволяют заключить, что искусственные неоднородности с масштабами от нескольких сотен метров до нескольких километров хорошо возбуждаются в вечерней и ночной ионосфере, и амплитуда относительных флуктуаций концентрации плазмы в них может достигать 10÷20%. Пороговая мощность генерации неоднородностей составляет 20÷30 MBт. В утренние часы измерений их интенсивность заметно слабее по сравнению с вечерними и ночными часами, а их возбуждение возможно только при высоких мощностях волны накачки порядка 100 MBт. В условиях дневной ионосферы они регистрировались только при мощности $P_{\rm spdp} \geq 100$ MBт. Наконец, полученные данные позволяют заключить, что генерация *F*-рассеяния при нагреве ионосферы мощными радиоволнами X-поляризации имела место в очень спокойных геомагнитных условиях при $\Sigma K_{\rm p} \leq 10$. В целом, полученные нами результаты хорошо согласуются с результатами исследований характеристик *F*-рассеяния, приведёнными, например, в [1, 15].

3.4. Генерация искусственных неоднородностей с масштабами $l_\perp pprox 3\div 100$ км

Исследования возмущений концентрации плазмы, вызываемых в ионосфере модификацией мощными короткими радиоволнами, в диапазоне масштабов от нескольких километров до сотни километров, удобно проводить с помощью зондирования возмущённой области сигналами спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС. В этих экспериментах измеряются вариации полного электронного содержания (ПЭС), которые пропорциональны изменению интегрального содержания плазмы в столбе единичного сечения на луче зрения до спутника. При этом разные участки возмущённой области вносят свой аддитивный вклад в вариации полного электронного содержания. Так, на изменение полного электронного содержания влияют следующие факторы: увеличение в дневных условиях концентрации плазмы на высотах 130÷150 км при её нагреве мощными радиоволнами из-за зависимости коэффициента рекомбинации от температуры; диффузионное выталкивание плазмы на высотах *F*-области ионосферы из областей её разогрева; развитие искусственных неоднородностей в возмущённой области ионосферы; уменьшение концентрации плазмы в результате её выталкивания из областей с сильным электрическим полем за счёт действия силы стрикционного давления; увеличение концентрации плазмы из-за дополнительной ионизации энергичными электронами; формирование дактов с повышенной концентрацией плазмы на высотах внешней ионосферы и др. Все эти процессы имеют разную эффективность в различных слоях ионосферы, также зависят от времени суток, уровня естественной возмущённости ионосферной плазмы, от частоты, мощности и временного режима излучения волны накачки. Роль этих процессов при модификации ионосферы волнами О-поляризации исследовалась в работах [39–41]. Ясно, что некоторые из перечисленных выше эффектов должны приводить к вариациям полного электронного содержания и при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации. Ниже мы проанализируем результаты соответствующих измерений.

Рассмотрим результаты измерений, выполненных в августе–сентябре 2012 года, когда стенд «Сура» в одни дни излучал волны О-поляризации, а в другие — волны Х-поляризации. Результаты предварительной обработки этих измерений приведены в работе [46]. Для иллюстрации полученных результатов мы выбрали сеансы измерений за 28 августа 2012 года, когда стенд с 20:40 до 22:30 MSK излучал волны О-поляризации на частоте 4785 кГц с мощностью $P_{\rm эф\phi} \approx 100$ MBT в режиме [+10 мин; –10 мин] с наклоном диаграммы направленности на 12° к югу (область магнитного зенита для волны накачки, см. рис. 3). В этом сеансе луч зрения на спутник пересекал возмущённую область с юго-запада на северо-восток, проходя через центр диаграммы направленности пучка мощных радиоволн. Измерения выполнялись в спокойных магнитных условиях при $\Sigma K_{\rm p} = 5^+$.



Рис. 3. Пример зондирования возмущённой области ионосферы сигналом спутника GPS в 16:30÷18:30 UT 28 августа 2012 года. Мощная волна О-поляризации излучалась в режиме [+10 мин; -10 мин] на частоте f = 4.785 кГц с мощностью $P_{\rm эфф} = 100$ МВт и наклоном диаграммы на 12° к югу

В. Л. Фролов, И. А. Болотин, Г. П. Комраков и др.

2014



Рис. 4. Пример зондирования возмущённой области ионосферы сигналом спутника GPS в 16:30÷18:00 UT 3 сентября 2012 года.

На рис. 4 приведены данные измерений 3 сентября, когда стенд с 21:00 до 22:00 MSK излучал волны X-поляризации с наклоном диаграммы направленности на 12° к югу в режиме 15 мин-

В. Л. Фролов, И. А. Болотин, Г. П. Комраков и др.

излучение на частоте 6720 кГц с мощностью $P_{3\phi\phi} \approx 150$ МВт, 20 мин — пауза, 10 мин — излучение на частоте 5 455 кГц с мощностью $P_{3\phi\phi} \approx 120$ МВт, 15 мин — пауза. Измерения выполнялись в условиях средней возмущённости при $\Sigma K_{\rm p} = 33^-$. Здесь и далее на панелях *a* в географических координатах представлены местоположение стенда «Сура», положение диаграммы направленности на высоте отражения волны накачки по уровням плотности потока энергии 0,5 и 0,1 (сплошными и пунктирными кривыми соответственно), треугольниками показано положение подыносферной точки луча на спутник по его сечению возмущённой области на уровне отражения мощной радиоволны. На панелях *б* и *е* показаны детрендированные значения вариаций ПЭС и их вэйвлет-спектр соответственно. При этом на панели *б* на оси времени отмечены интервалы работы стенда, на панели *e* время отсчитывается от начала сеанса, по вертикали отложен период вариаций *T*, оттенками серого показана спектральная интенсивность *S*. На панелях *б* и *г* вертикальными прямыми отмечена граница пересечения подыносферной точкой диаграммы направленности излучения мощной радиоволны по уровню 0,1. На рис. 3*г* дополнительно показаны результаты измерений ПЭС.

Начнём с рассмотрения представленных на рис. 3 результатов модификации ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации. Хорошо видно, что здесь имеет место сильное (до 1 TECU = $= 10^{16} \text{ m}^{-2}$) уменьшение ПЭС (формирование полости с обеднённым содержанием плазмы) на юго-западном крае диаграммы направленности пучка мощных радиоволн, близко к области магнитного зенита. Для полного развития этой полости возможно не хватило нагрева с продолжительностью 10 мин . Релаксация этой полости после выключения волны накачки в 17:30 UT, судя по представленным на рис. 3г результатам измерений, составляет примерно 3 мин. В ней также наблюдаются быстрые вариации ПЭС с длительностью 2÷3 мин с амплитудой до 0,3 TECU; более чётко их можно видеть на рис. 36. Такое поведение ПЭС характерно для вечерних и ночных часов измерений, когда луч на спутник проходит близко к направлению магнитного зенита (см. также [39, 47]). Небольшие вариации ПЭС до 0,1 TECU наблюдаются как вблизи центральной части возмущённой области (17:35÷17:50 UT), так и к юго-западу за диаграммой излучения пучка мощных радиоволн (17:10÷17:25 UT).

Если искусственные ионосферные неоднородности, которые обнаруживаются в 40÷50 км к юго-западу от края диаграммы направленности по уровню 0,1, появились в этой области за счёт дрейфа плазмы, как это наблюдалось, например, в [48], то скорость дрейфа в этом направлении можно оценить как 20÷25 м/с. При встречной скорости движения подыносферной точки $30\div35$ м/с размер возбуждаемых в области магнитного зенита неоднородностей должен составлять 7÷9 км, а размеры самой полости должны быть около 50 км. Полагая, что продольные (вдоль луча на спутник) размеры полости L_{\parallel} и неоднородностей составляют $50\div100$ км и $30\div50$ км соответственно, по вариациям ПЭС можно оценить величину относительных флуктуаций концентрации плазмы δN : для полости и для неоднородностей с размером $l_{\perp} \approx 8$ км эти величины составляют $35\div70\%$ и $25\div37\%$ соответственно. Полученные высокие значения δN могли бы быть уменьшены за счёт увеличения продольных размеров вариаций ПЭС. Однако приведённые выше величины L_{\parallel} для полости с дефицитом плазмы вблизи высоты отражения мощной радиоволны представляются нам наиболее подходящим, и они находятся в соответствии с полученными в других экспериментах данными (см., например, [49].

На рис. 4 представлены результаты измерений вариаций ПЭС, полученные при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации в более возмущённых условиях, чем для случая, представленного на рис. 3. Можно видеть, что в цикле нагрева 17:00÷17:15 UT, когда осуществлялось зондирование центральной части возмущённой области ионосферы, наблюдается появление слабых вариаций ПЭС с характерным периодом 3 мин, величина которых не превышает 0,02 TECU, что лишь немного выше уровня естественных флуктуаций. Эти вариации



Рис. 5. Пример зондирования возмущённой области и
оносферы сигналом спутника GPS в 15:30÷16:45 UT 21 марта 2012 года. Мощная волна X-поляризации излучалась в режиме [+5 мин; -5 мин] на частоте $f = 4\,785$ кГц с мощностью $P_{\rm эф\phi} = 90$ МВт и наклоном диаграммы на 12° к югу

наблюдаются ещё примерно 7 мин после окончания воздействия. Можно считать, что они связаны с генерацией искусственных неоднородностей в центральной части возмущённой области ионосферы с масштабами $l_{\perp} \approx 5 \div 10$ км и с относительными флуктуациями $\delta N \approx 1 \div 2 \%$.

В измерениях, выполненных в вечерней или ночной ионосфере (генерация искусственных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 5 \div 10$ км), амплитуда вариаций ПЭС, как правило, составляла 0,2 \div 0,4 ТЕСИ и 0,02 \div 0,03 ТЕСИ при модификации F_2 -области ионосферы мощными радиоволнами О- и Х-поляризаций соответственно. Таким образом, можно заключить, что ге-

В. Л. Фролов, И. А. Болотин, Г. П. Комраков и др.

нерация таких крупномасштабных искусственных неоднородностей при мощностях излучения волн накачки 100÷150 MBт, по крайней мере на порядок менее эффективна при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации. Следует отметить, что при модификации ионосферы волнами Х-поляризации никогда не наблюдалось формирование полости с большим (10% и более) дефицитом концентрации плазмы в F_2 -области вблизи высоты отражения мощной радиоволны, как это имеет место для волн О-поляризации, для которых выполняются условия их сильного резонансного взаимодействия с плазмой верхней ионосферы.

На рис. 5 представлен сеанс модификации ионосферы в 15:30÷16:45 UT 21 марта 2012 года, когда стенд «Сура» излучал на частоте 4785 кГц волны Х-поляризации с мощностью 90 МВт в режиме [+15 мин; -5 мин] с наклоном диаграммы направленности 12° к югу. Луч на спутник пересекал диаграмму направленности с юго-запада на северо-восток, проходя практически через центр пучка мощных радиоволн (см. рис. 5*a*). На рис. 5*b*, *b* представлены вариации ПЭС с удалённым трендом и их вэйвлет-спектр. Наибольшие флуктуации ПЭС с амплитудой до 0,02 ТЕСИ с периодом около 5 мин регистрировались, когда луч на спутник уже выходил за диаграмму направленности по уровню $0,1P_{\rm max}$, в то время как в центре диаграммы направленности искусственные вариации ПЭС не превышали уровня их естественных флуктуаций.

Такая динамика ПЭС при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации наблюдалась довольно часто. Более того, наиболее сильные вариации ПЭС с амплитудой до 0,04÷0,06 ТЕСИ регистрировались в тех экспериментах, когда луч на спутник проходил по касательной к краю возмущённой области. Сеанс с такими условиями в 15:00÷18:05 UT 23 марта 2012 года представлен на рис. 6. Стенд «Сура» излучал вертикальный пучок мощных радиоволн с Х-поляризацией на частоте 5828 кГц с мощностью 120 МВт в режиме [+15 мин; -5 мин]. Видно, что в наиболее близком к центру диаграммы направленности участку траектории спутника выделяются периодические последовательности с $T \approx 7 \div 10$ мин (при периоде модуляции мощности излучения 10 мин). Здесь также регистрируется наличие волнового процесса с периодом $T \approx 5 \div 6$ мин на интервале времени 15:52 $\div 16$:10 UT или на расстоянии до 60 км на юго-запад от границы диаграммы направленности по уровню 0,1P_{max}. Если это плазменные возмущения, пришедшие из области своей генерации на краю диаграммы направленности, то скорость их распространения в юго-западном направлении должна составлять 70 м/с; это значение соответствует наблюдаемым скоростям дрейфа плазмы в ночных условиях на высотах F₂-области среднеширотной ионосферы и сделанным выше оценкам. Сами возмущения должны при этом иметь характерный масштаб порядка 20 км.

Таким образом, как ранее полученные данные (см., например, в [48]), так и результаты напих исследований показывают, что область ионосферы, заполненная искусственными неоднородностями с километровыми масштабами при воздействии мощными короткими радиоволнами в вечернее и ночное время оказывается вытянута на 50 км и больше вдоль направления дрейфа плазмы в верхней ионосфере. Кроме того, на основе этих данных можно заключить, что наблюдаемые в какой-либо части возмущённой области вариации ПЭС определяются не только генерируемыми в этой части возмущениями, но и возмущениями, пришедшими за счёт дрейфа плазмы. Ясно, что регистрируемые при этом вариации ПЭС могут иметь сложную форму, которая не всегда хорошо коррелирует с модуляцией мощности волны накачки. Такие случаи отмечались ранее в работах [39–41, 50]. Также можно заключить, что регистрируемое в эксперименте уменьшение амплитуды флуктуаций концентрации плазмы в центре возмущённой области определяется не только временем их релаксации за счёт диффузионного расплывания, но и направлением и скоростью их дрейфа, а также распределением амплитуды неоднородностей по возмущённой области ионосферы.

Другой пример, когда луч на спутник проходил по касательной к краю возмущённой обла-



Рис. 6. Пример зондирования возмущённой области и
оносферы сигналом спутника GPS в 15:00÷18:05 UT 23 марта 2012 года. Мощная волна X-поляризации излучалась вертикально в режиме [+5 мин; -5 мин] кГц на частоте
 $f=5\,828$ с мощностью $P_{\rm эф\phi}=120~{\rm MBr}$



Рис. 7. Пример зондирования возмущённой области ионосферы сигналом спутника GPS в 15:39÷17:20 UT 26 сентября 2011 года. Мощная волна Х-поляризации излучалась вертикально в режиме [+3 мин; -3 мин] на частоте $f = 5\,828$ кГц с мощностью $P_{эф\phi} = 120$ MBT

сти, представлен на рис. 7, на котором приведён сеанс модификации ионосферы, выполненный 26 сентября 2011 года с 15:39 до 17:20 UT. Стенд «Сура» излучал вертикальный пучок мощных радиоволн Х-поляризации на частоте 5828 кГц с мощностью 120 МВт в режиме [+3 мин; – –3 мин]. В наиболее близком к центру диаграммы направленности участке траектории спутника

В. Л. Фролов, И. А. Болотин, Г. П. Комраков и др.



Рис. 8. Пример зондирования возмущённой области ионосферы сигналом спутника GPS в 03:40÷04:55 UT 22 марта 2011 года. Мощная волна Х-поляризации излучалась в режиме [+5 мин; -5 мин] на частоте f = 4785 кГц с мощностью $P_{\rm эф\phi} = 90$ МВт и наклоном диаграммы на 12° к югу

абсолютные значения вариаций ПЭС составляют около 0,05 ТЕСU. При этом в вариациях нет выделенных временны́х масштабов, которые могли бы соответствовать гармоникам волны накачки или периоду модуляции мощности излучения (6 мин). Более сильные вариации ПЭС с амплитудой до 0,12 ТЕСU регистрировались к юго-западу от диаграммы направленности с 15:53 до 16:45 UT (или на расстоянии до 120 км от её границы по уровню 0,1 $P_{\rm max}$). Здесь с 16:00 до

В. Л. Фролов, И. А. Болотин, Г. П. Комраков и др.

16:30 UT выделяются вариации с периодом $T \approx 5$ мин, близким к периоду модуляции мощности излучения волны накачки. Очень возможно, что здесь наблюдается проявление перемещающихся ионосферных возмущений, сгенерированных периодическим нагревом ионосферы мощной радиоволной. Появление аналогичных волновых структур наблюдалось ранее в работах [41–44].

В ряде случаев усиление генерации искусственных неоднородностей с километровыми масштабами при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации было зарегистрировано нами в утренние и дневные часы наблюдений. На рис. 8 приведён пример наблюдаемых вариаций ПЭС 22 марта 2012 года в сеансе с 03:40 до 04:55 UT, когда мощная радиоволна излучалась на частоте 4 785 кГц с мощностью $P_{\rm эф\phi} \approx 90$ МВт в режиме [+5 мин; -5 мин] с наклоном диаграммы направленности излучения на 12° к югу. Хорошо видно появление вариаций ПЭС с периодами около 10 мин и амплитудой до 0,03 ТЕСU и более слабые вариации ПЭС с периодами около 5 мин, когда луч на спутник подходил к юго-западному краю диаграммы.

4. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Анализ экспериментальных данных, полученных при модификации F₂-области ионосферы мощными радиоволнами X-поляризации, позволяет заключить следующее.

1) В наших экспериментах, в отличие от аналогичных экспериментов в авроральной ионосфере на нагревном стенде EISCAT [22–24], не наблюдалась генерация искусственных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 10 \div 20$ м.

2) Генерация неоднородностей с масштабами $l_{\perp} = 50 \div 200$ м имела место при модификации вечерней и ночной ионосферы. При этом их амплитуда была меньше только на 4÷6 дБ, чем в случае модификации ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации. В утренних и дневных условиях проведения измерений отсутствие генерации этих неоднородностей связывается с большим регулярным поглощением в нижних слоях ионосферы и с формированием дефокусирующей линзы на высотах 130÷150 км.

3) В вечерних и ночных условиях имела место генерация искусственных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} = 0,3\div3$ км, проявляющаяся как развитие достаточно интенсивного *F*-рассеяния на ионограммах вертикального зондирования. При этом в оптимальных условиях проведения измерений интенсивность *F*-рассеяния, а следовательно и амплитуда неоднородностей, уступала интенсивности при модификации ионосферы волнами О-поляризации, но не более чем в несколько раз. В утренние часы даже при мощности волны накачки около 100 MBt *F*-рассеяние либо не развивалось, либо имело низкую интенсивность. В дневных условиях появление *F*-рассеяния на ионограммах было достаточно редким явлением, его интенсивность при этом имела низкий уровень. Также отмечается, что в вечерней и ночной ионосфере пороговые мощности генерации искусственных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} = 0,3\div3,0$ км не превышали $20\div30$ MBt, а сама генерация неоднородностей имела меньшие характерные времена развития и большие времена релаксации, чем в условиях дневной ионосферы.

4) Генерация искусственных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} = 5 \div 10$ км и более крупномасштабных неоднородностей на высотах вблизи максимума F_2 -слоя ионосферы имела место только в вечерней и ночной ионосфере. При этом их интенсивность была на порядок ниже их интенсивности при модификации ионосферы волнами О-поляризации.

5) Во всём диапазоне исследуемых пространственных масштабов генерация искусственных неоднородностей наблюдалась только в условиях отражения мощных радиоволн Х-поляризации.

Таким образом, можно предполагать, что в среднеширотной ионосфере декаметровые неоднородности возбуждаются только при воздействии мощными радиоволнами О-поляризации, и это происходит за счёт развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости [3].

Развитие более крупномасштабных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 0,3\div1,0$ км при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации, следует, по-видимому, связывать с развитием самофокусировочной неустойчивости [3, 5, 10, 14]. Механизм генерации более мелкомасштабных искусственных неоднородностей ($l_{\perp} \approx 50\div200$ м), скорее всего, связан с нелинейной перекачкой энергии плазменной турбулентности по её спектру от более крупных масштабов к более мелким [51]. Однако этот вывод нуждается в дальнейшем подтверждении. Искусственные неоднородности с размерами от нескольких до десятка и более километров, по-видимому, являются результатом усиления естественных неоднородностей при нагреве ионосферной плазмы на высотах F_2 -области [49]. В силу всего вышесказанного, спектр искусственных неоднородностей при модификации ионосферы Х-волнами обрывается для неоднородностей с масштабами $l_{\perp} <$ < 50 м, его спектральная интенсивность в несколько раз слабее по сравнению со случаем нагрева О-волнами в области масштабов 50 м $\div3$ км и имеет заметно более слабую (по сравнению со случаем нагрева О-волнами) спектральную интенсивность в области масштабов $l_{\perp} \ge 5$ км.

Как было установлено в [13] и отмечалось в разделе 1 данной работы, при модификации дневной ионосферы мощными радиоволнами обеих поляризаций на высотах 130÷150 км в результате нагрева плазмы и нарушения из-за этого ионизационно-рекомбинационного баланса образуется область с увеличенной на 10÷20% концентрацией плазмы, которая играет роль дефокусирующей линзы.

Остановимся подробнее на обнаруженной в данной работе особенности генерации искусственных неоднородностей с километровыми масштабами при модификации ионосферы мощными радиоволнами X-поляризации: наиболее интенсивные неоднородности регистрировались в области вблизи границы диаграммы направленности по уровню $0,1P_{\rm max}$. Эту особенность естественно связывать с наиболее быстрым изменением интенсивности электрического поля мощной радиоволны в поперечном к оси пучка направлении и, следовательно, с неоднородным нагревом плазмы по этому направлению. Это, согласно работе [52], может привести к генерации крупномасштабных искусственных неоднородностей на границе пучка мощных радиоволн, причём более интенсивной как раз для волн X-поляризации.

Как видно из представленных в работе экспериментальных данных, возбуждаемые неоднородности с километровыми масштабами вызывают вариации ПЭС с амплитудой от 0,02 до 0,05 TECU (редко до 0,1 TECU). При продольном масштабе таких неоднородностей около 30 км относительные флуктуации концентрации плазмы в них составляют $\delta N \approx 2 \div 5 \%$. Также следует отметить, что при режиме нагрева плазмы [+5 мин; -5 мин] наиболее выраженные вариации ПЭС на краю диаграммы направленности, как правило, имеют период 5 мин. Это значит, что существенными здесь являются как моменты включения, так и выключения мощной радиоволны, когда развитие и релаксация искусственной ионосферной турбулентности в ионосферной плазме протекают наиболее интенсивно, что возбуждает наиболее сильные токи по периметру возмущённой области.

Можно ожидать такого же краевого эффекта и при модификации ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации. Действительно, эффект, который может быть отнесён к рассматриваемому здесь явлению, был отмечен нами в работе [39]. В качестве примера рассмотрим представленные на рис. 9*a* результаты зондирования возмущённой области ионосферы сигналами GPS 15 марта 2009 года, сеанс с 11:51 до 13:56 UT. Луч на спутник (см. рис. 9) пересекал возмущённую область с северо-запада на восток, проходя несколько севернее центральной части диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн. Модификация ионосферы осуществлялась в режиме [+5 мин; -5 мин] на частоте 4 300 кГц с мощностью $P_{эфф} \approx 80$ МВт и наклоном диаграммы направленности излучения на 12° к югу. Скобками на рис. 9*b* отмечены периоды излучения волны накачки. Хорошо видно, что в центре диаграммы направленности с 12:05 до 12:15 UT преобладают вариации с периодом 12 мин, что соответствует режиму излучения мощной ра-



Рис.9. Пример зондирования возмущённой области ионосферы сигналом спутника GPS в 11:51÷13:56 UT 15 марта 2009 года. Мощная волна О-поляризации излучалась в режиме [+5 мин; -5 мин] на частоте $f = 4\,300$ кГц с мощностью $P_{\rm эф\phi} = 80$ МВт и наклоном диаграммы на 12° к югу. Тёмные области на панели (ϵ) соответствуют увеличению вейвлет-амплитуды вариаций полного электронного содержания

В. Л. Фролов, И. А. Болотин, Г. П. Комраков и др.

диоволны, в то время как до этого с 11:30 до 12:05 UT на северо-западном краю диаграммы направленности преобладающими являются вариации ПЭС с периодом 5÷6 мин, а на восточном краю диаграммы с 12:25 до 12:45 UT — вариации с периодом 7÷9 мин, т. е. на близких ко второй гармонике частотах основных вариаций. Аналогичные результаты можно найти и в других выполненных нами экспериментах. Как отмечалось в работе [39], время регистрации вариаций с половинным периодом, как правило, не совпадает с временем регистрации основных вариаций; они часто хорошо выделяются только на одном из краёв диаграммы направленности, а иногда они могут вовсе не выделяться на фоне естественных и искусственных возмущений ПЭС.

Следует ожидать, что отмеченный выше краевой эффект генерации искусственных неоднородностей с километровыми масштабами может проявляться при исследовании и других свойств искусственной ионосферной турбулентности. В связи с этим отметим следующие экспериментальные данные, которые до сих пор не получили удовлетворительной интерпретации.

В [53] было показано, что для неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 3 \div 9$ м времена их релаксации в центре возмущённой области были в несколько раз меньше, чем на её краях. Возможно, более медленная релаксация мелкомасштабных искусственных неоднородностей связана с влиянием рассмотренного выше краевого эффекта. При этом нельзя исключать, что наблюдающаяся в вечерних и ночных условиях вторая более медленная стадия релаксации декаметровых неоднородностей (см., например, [33, 34, 51]) может также быть связана с этим эффектом. В [54] было установлено, что в ряде случаев сильный дополнительный сигнал ракурсного рассеяния на декаметровых неоднородностях наблюдается из локальной области, отстоящей от центра диаграммы направленности пучка мощных радиоволн на 100÷150 км. Нельзя исключать, что появление такой локальной области с декаметровыми неоднородностями также может определяться влиянием краевого эффекта с одновременным выполнением иных условий. Наконец, возмущение плазмы в масштабе диаграммы направленности пучка мощных радиоволн после достаточно длительного их излучения (дольше, чем 10 мин) может также увеличивать длительность релаксации поглощения радиоволн в нижней ионосфере до 10 мин [1]. Естественно, для подтверждения высказанных гипотез необходимо выполнить целенаправленные экспериментальные исследования.

Альтернативное объяснение «краевого эффекта» более интенсивной генерации неоднородностей за пределами главного луча диаграммы направленности антенны стенда было предложено в работе [55]. В [55] было показано, что формирование крупномасштабных плазменных образований в центре диаграммы направленности может существенным образом исказить траектории распространения мощных радиоволн, приводя к такой ситуации, что вне диаграммы направленности появляются области сгущения силовых линий, в которых должно наблюдаться усиление генерации плазменной турбулентности. Аналогичный учёт рефракционных эффектов был также использован в работе [56].

Заканчивая обсуждение полученных результатов, перечислим возможные эксперименты, которые желательно провести в будущем для более полного прояснения природы явлений, наблюдаемых при нагреве ионосферной плазмы волнами Х-поляризации. В первую очередь, необходимо выяснить влияние ширины пучка мощных радиоволн (радиального распределения интенсивности электромагнитного излучения волны накачки) на характеристики явлений, связанных с модификацией плазмы в пределах диаграммы направленности излучения мощной радиоволны и роли краевых эффектов. Во-вторых, остаются до конца не исследованными особенности генерации различных компонент плазменной турбулентности, возникающей при нагреве Х-волнами на гармониках гирочастоты электронов. В-третьих, необходимо более детально изучить свойства наблюдаемых эффектов в зависимости от времени суток, близости частоты волны накачки к критической частоте F_2 -слоя ионосферы, частоты и мощности волны накачки, интенсивности регулярного и спорадического E-слоёв. В-четвёртых, необходимо сопровождать эксперимен-

ты измерением вариаций магнитного поля с целью выяснения роли возбуждаемых при нагреве Х-волнами токов в возмущённой области ионосферы. В-пятых, следует продолжить изучение свойств обнаруженных в работе [57] индуцированных нагревом ионосферы дрейфовых движений плазмы в возмущённой области, уделяя внимание их зависимости от мощности и поляризации волны накачки и от ионосферных условий.

Авторы выражают благодарность сотрудникам стенда «Сура» за помощь в проведении экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Геофизика» и РФФИ (проекты 13–05–01122, 13–05–00511, 13–02–12074, 13–02–12241, 14–05–31445, 14–05–00855 и 14–05–10069).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Utlaut W. F., Violette E. J. // Radio Sci. 1974. V. 9. P. 895.
- Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 4. С. 516.
- 3. Гуревич А.В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
- 4. Гинзбург В. Л. Электромагнитные волны в плазме. М.: Наука, 1967. 683 с.
- 5. Васьков В. В., Гуревич А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 9. С. 1 261.
- Беликович В. В., Бахметьева Н. В., Толмачёва А. В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999.
- 7. Frolov V. L., Kagan L. M., Sergeev E. N., et al. // J. Geophys. Res. A. 1999. V. 104, No. 6. P. 12695.
- 8. Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1-2. С. 122.
- 9. Hansen J. D., Morales G. J., Duncan L. M., et al. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 65. P. 3 285.
- Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973.
- 11. Löfås H., Ivchenko N., Gustavsson B., et al. // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 2585.
- Gustavsson B., Rietveld M., Ivchenko N. // RF Ionospheric Interactions Workshop, Boulder, Colorado, 19–22 April 2009. Abstracts on CD. http://ionos-workshop.gi.alaska.edu/.
- Бойко Г. Н., Васьков В. В., Голян С. Ф. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 8. С. 960.
- Guzdar P. N., Chaturvedi P. K., Papandopoulos K., Ossakow S. L. // J. Geophys. Res. A. 1998. V. 103, No. 2. P. 2 231.
- 15. Алимов В. А., Выборнов Ф. И., Митякова Э. Е., Рахлин А. В. // Физические проблемы экологии (Экологическая физика). 2002. № 9. С. 6.
- 16. Allen E. M., Thome G. D., Rao P. B. // J. Geophys. Res. 1974. V. 9, No. 11. P. 905.
- 17. Zabotin N. A., Bronin A. G., Zhbankov G. A., et al. // Radio Sci. 2002. V. 37, No. 6. P. 1102.
- 18. Gustavsson B., Newsome R., Leyser T. B., et al. // Geophys. Res. Lett. V. 36. Art. no. L20102.
- 19. Fialer P. A. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 923.
- 20. Minkof J., Kugelman P., Weissman I. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 941.
- 21. Robinson T. R., Stocker A. J., Bond G. E., et al. // Ann. Geophys. 1997. V. 15. P. 134.
- 22. Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Йоман Т. К., Ритвелд М. Т. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 9–10. С. 571.
- Blagovethshenskaya N. F., Borisova T. D., Yeoman T. K., et al. // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. Art. no. L08802.
- Blagovethshenskaya N. F., Borisova T. D., Yeoman T. K., et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2013. V. 105–106. P. 231.
- 25. Васьков В. В., Рябова Н. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40, № 5. С. 541.

- 26. Kagan L. M. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 3. С. 318.
- 27. Lee M. C., Kuo S. P. // Radio Sci. 1985. V. 20, No. 3. P. 539.
- 28. Papadopoulos K., Chang C. L. // Geophys. Res. Lett. 1985. V. 12, No. 5. P. 279.
- 29. Bochkarev K. V., Zybin K. P. // Phys. Lett. A. 2010. V. 374. P. 1508.
- Гущин М. Е., Коробков С. В., Костров А. В., Стриковский А. В. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, вып. 11. С. 834.
- Papadopoulos K., Tesfaye B., Shroff H., et al. // American Geophys. Union. Fall Meeting. 2007. Abstracts on CD. http://www.agu.org/.
- 32. Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Вяхирев В.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 5–6. С. 338.
- Беликович В. В., Ерухимов Л. М., Зюзин В. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31, № 3. С. 251.
- Frolov V. L., Erukhimov L. M., Metelev S. A., Sergeev E. N. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59, No. 18. P. 2 317.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 669.
- Фролов В. Л., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 4. С. 273.
- Болотин И. А., Фролов В. Л., Акчурин А. Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 66.
- Сергеев Е. Н., Зыков Е. Ю., Акчурин А. Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 79.
- Фролов В. Л., Комраков Г. П., Куницын В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 7. С. 421.
- 40. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Vasiliev A. E., et al. // Adv. Space Res. 2011. V. 47, No. 10. P. 1743.
- 41. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L., et al. // Radio Sci. 2012. V. 47. Art. no. RS0L15.
- 42. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 81.
- 43. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 14.
- 44. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 5. С. 327.
- 45. Алимов В. А., Выборнов Ф. И., Караштин А. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 3. С. 207.
- 46. Куницын В.Е., Падохин А.М. Болотин И.А., Фролов В.Л. // Сб. докл. Международной научно-практической студенческой конф., г. Казань, Зеленодольск, 29–30 ноября 2012 года. С. 29.
- 47. Терещенко Е. Д., Миличенко А. Н., Фролов В. Л., Юрик Р. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 934.
- 48. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19, № 12. С. 1902.
- 49. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
- 50. Рябов А. В., Грач С. М., Шиндин А. В., Котик Д. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 7. С. 2.
- Hysell D. L., Kelley M. C., Yampolski Yu. M., et al. // J. Geophys. Res. A. 1996. V. 101, No. 12. P. 26 981.

- 52. Kuo S., Cheng W.-T., Snyder A., et al. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. Art. no. L01101.
- 53. Ерухимов Л. М., Коровин А. В., Митяков Н. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25, № 11. С. 1 360.
- 54. Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Понятов А. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 12. С. 1011.
- 55. Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., et al. // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. Art. no. L18107.
- 56. Ружин Ю. Я., Кузнецов В. Д., Пластинин Ю. А. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53, № 1. С. 1.
- Koloskov A. V., Leyser T. B., Yampolski Yu. M., Beley V. S. // J. Geophys. Res. A. 2002. V. 107, No. 7. Doi:10.1029/2001JA000154.

Поступила в редакцию 9 января 2014 г.; принята в печать 1 апреля 2014 г.

GENERATION OF ARTIFICIAL IONOSPHERIC IRREGULARITIES IN THE EARTH'S MIDLATITUDE IONOSPHERE AFFECTED BY HIGH-POWER HIGH-FREQUENCY X-MODE RADIO WAVES

V. L. Frolov, I. A. Bolotin, G. P. Komrakov, A. V. Pershin, G. G. Vertogradov, V. G. Vertogradov, E. G. Vertogradova, V. E. Kunitsyn, A. M. Padokhin, G. A. Kurbatov, A. D. Akchurin, and E. Yu. Zykov

We consider the properties of the artificial ionospheric irregularities excited in the ionospheric F_2 region modified by high-power high-frequency X-mode radio waves. It is shown that small-scale (decametric) irregularities are not generated in the midlatitude ionosphere. The intensity of irregularities with the scales $l_{\perp} \approx 50-3$ km is severalfold weaker compared with the case where the irregularities are excited by high-power O-mode radio waves. The intensity of the more large-scale irregularities is still stronger attenuated. It is found that the generation of large-scale ($l_{\perp} \approx 5-10$ km) artificial ionospheric irregularities is enhanced at the edge of the directivity pattern of a beam of high-power radio waves.