

УДК 533.951+537.868

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ГЕНЕРАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С ПОПЕРЕЧНЫМИ МАСШТАБАМИ 50÷200 м

И. А. Болотин¹, В. Л. Фролов*^{1,2}, А. Д. Акчурина², Е. Ю. Зыков²

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

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

В работе рассмотрены особенности генерации неоднородностей с поперечными по отношению к геомагнитному полю масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м при модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами. Установлено, что в F -области ионосферы существуют, по крайней мере, два механизма, ответственных за генерацию таких неоднородностей. Первый механизм связан с резонансным взаимодействием радиоволн с ионосферной плазмой, второй имеет место даже в отсутствие резонансного взаимодействия. Для разделения механизмов в измерениях использовалась различная поляризация мощного излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Среди целого ряда эффектов, наблюдаемых при воздействии мощными короткими радиоволнами на ионосферу Земли, одним из наиболее важных является генерация искусственных ионосферных неоднородностей. Они возбуждаются в широком диапазоне поперечных к геомагнитному полю масштабов (от долей метра до десятка и более километров) и влияют на распространение радиоволн различных частотных диапазонов. Свойства этих неоднородностей изучались многими авторами. На основе выполненных исследований были определены спектральные характеристики при возбуждении неоднородностей в вечерних и ночных условиях вблизи высоты отражения мощной радиоволны с обыкновенной поляризацией, когда частота волны накачки находится вне областей резонансов с гармониками гирочастоты электронов [1–4]. В частности, было установлено существование двух спектральных максимумов, первый из которых обнаруживается в области масштабов $l_{\perp} \approx 30 \div 50$ м и связан с развитием тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости [5–7], а второй относится к области масштабов $l_{\perp} \approx 300 \div 800$ м и обусловлен самофокусировочной неустойчивостью мощной радиоволны [8–10]. Механизм генерации искусственных ионосферных неоднородностей в области промежуточных масштабов $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м оставался до последнего времени неизученным. В работах [11–13] было показано, что эти неоднородности имеют высокую интенсивность и вызывают сильное рассеяние пробных радиоволн обеих поляризаций, зондирующих возмущённую область ионосферы на частотах, близких к частоте волны накачки.

Целью данной работы является определение особенностей генерации искусственных ионосферных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м. Рассматриваемые в работе экспериментальные данные были получены при модификации ионосферы с помощью нагревного стенда «Сура». В разделе 1 представлены используемые методы диагностики таких неоднородностей, рассмотрены возможности и ограничения этих методов; также обсуждаются режимы воздействия на ионосферу Земли, которые применялись нами для решения поставленной задачи. В разделе 2 анализируются полученные экспериментальные данные. В заключение подведены итоги выполненных исследований.

* frolov@nirfi.unn.ru

1. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Основным инструментом для диагностики искусственных ионосферных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м в выполняемых нами на стенде «Сура» экспериментах является модифицированный ионозонд лаборатории физического факультета Казанского (Приволжского) Федерального Университета. Благодаря широкой диаграмме направленности излучения, ионозонд в режиме обратного рассеяния может зондировать возмущённую над стендом область ионосферы. Сигналы ионозонда, рассеянные на возбуждаемых при работе стенда «Сура» неоднородностях, проявляются на ионограммах в виде дополнительных диффузных следов, анализ которых позволяет делать некоторые выводы о свойствах неоднородностей.

Важную роль здесь играет выгодное географическое положение ионозонда. Дело в том, что в используемом диапазоне частот 1,4–7,0 МГц из-за сильной рефракции радиоволн в ионосфере измерения лучше всего выполнять, когда приёмопередающий комплекс располагается достаточно близко к нагревному стенду (в пределах половины скачка для зондирующих радиоволн). Особенностью этого ионозонда также является то, что в паузы между снятием ионограмм он может переводиться в режим зондирования на нескольких фиксированных частотах. Это позволяет следить за динамикой рассеянного сигнала, оценивать времена развития и релаксации соответствующих неоднородностей.

Более детально описание ионозонда и особенностей проведения исследований с его помощью представлено в работе [13]. Там же показано, что данная методика даёт уникальную возможность регистрации и диагностики искусственных ионосферных неоднородностей в диапазоне масштабов $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м во всей толще ионосферы (от высот E -области до высот максимума слоя F_2). При этом в дневные часы рассеяние, как правило, наблюдается только на частотах выше 4 МГц и имеет невысокую интенсивность; при переходе к вечерним и особенно к поздним вечерним часам наблюдений интенсивность рассеяния сильно увеличивается и оно занимает всё более широкую полосу частот, опускаясь вниз примерно до 1,4 МГц.

Ясно, что для такой геометрии расположения радара и возмущённой области ионосферы рассеяние на неоднородностях различных масштабов в используемом диапазоне частот зондирования происходит с разных высот. Так, в вечерних условиях в зависимости от вида профиля концентрации ионосферной плазмы рассеяние на неоднородностях с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 100$ м идёт с высот выше 200 км, на неоднородностях с масштабами $l_{\perp} \approx 100 \div 150$ м — с высот 150–200 км, на неоднородностях с масштабами $l_{\perp} \approx 200$ м — с высот ниже 150 км. В дневных условиях радиоволны на частотах ниже 4 МГц могут зондировать только высоты 100–150 км, где имеет место их рассеяние на неоднородностях с $l_{\perp} \approx 100 \div 200$ м; зондировать F_2 -область здесь можно только на частотах выше 5 МГц, что соответствует рассеянию на неоднородностях с масштабом $l_{\perp} \approx 50$ м.

В работе [13] отмечаются некоторые ограничения используемой методики. Так, регистрация рассеянных сигналов из F_2 -области ионосферы (особенно на частотах ниже 4–5 МГц) возможна только в отсутствие мощных спорадических слоёв E , появление которых приводит к экранировке возмущённой области на высотах $h > 100 \div 130$ км. При мощных (непрозрачных) спорадических слоях E зондирование возмущённой области становится невозможным.

При постановке экспериментов по изучению особенностей генерации искусственных ионосферных неоднородностей нами учитывались следующие свойства искусственной ионосферной турбулентности, возбуждаемой при модификации магнитоактивной плазмы мощными радиоволнами. Как известно, при воздействии на верхнюю ионосферу мощными короткими радиоволнами с обыкновенной (O) поляризацией на частотах, близких к гармонике гирочастоты электронов, в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой в определённых условиях имеет место двойной резонанс, когда выполняется равенство $\omega \approx n\omega_{ce} \approx \omega_{UH}(z)$ (здесь ω — частота волны

накачки, ω_{ce} — гирочастота электрона в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой, n — целое число, $\omega_{UH}(z)$ — верхнегибридная частота). При этом происходит подавление параметрического взаимодействия мощной радиоволны с плазмой в области верхнегибридного резонанса и, как следствие этого, подавление генерации мелкомасштабных ($l_{\perp} \approx 50$ м) неоднородностей [14] и возбуждения тепловых компонент искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) [15–17]. Последнее обстоятельство используется во время проведения измерений для поиска условия двойного резонанса. Природа этого эффекта состоит в том, что при соблюдении условия двойного резонанса в небольшом диапазоне частот волны накачки вокруг гармоники гирочастоты электронов имеет место отсутствие генерации верхнегибридных плазменных колебаний. Это существенным образом сказывается на характере взаимодействия мощной радиоволны с О-поляризацией с плазмой [14]. Таким образом, наличие гирогармонических свойств в генерации искусственных ионосферных неоднородностей прямо свидетельствует о том, что в этом механизме должны быть задействованы высокочастотные плазменные колебания (здесь и далее под гирогармоническими свойствами мы будем подразумевать зависимость характеристик искусственных ионосферных неоднородностей от соотношения частоты волны накачки и гармоники гирочастоты электронов).

При постановке экспериментов также учитывался тот факт, что эффекты, наблюдаемые при воздействии на ионосферу мощными радиоволнами с необыкновенной (Х) поляризацией, значительно отличаются от эффектов, наблюдаемых при воздействии на ионосферу волнами с О-поляризацией. Это связано с тем, что волны с Х-поляризацией не участвуют в резонансном взаимодействии с плазмой (в нашем случае волны накачки с плазмой), поскольку они отражаются от ионосферы ниже уровня плазменных резонансов [18]. Их воздействие на ионосферу ограничивается омическим нагревом плазмы, развитием самофокусировочной неустойчивости и генерацией искусственных периодических неоднородностей в поле стоячей волны, образованной падающей на ионосферу и отражённой от неё волнами. Из сравнения характеристик возбуждаемой мощной радиоволной ионосферной турбулентности при разных поляризациях излучения волны накачки можно сделать определённые выводы о роли резонансных эффектов во взаимодействии мощной радиоволны с плазмой. С другой стороны, воздействие мощными радиоволнами с Х-поляризацией, которые не участвуют в резонансных взаимодействиях с плазмой, позволяет исследовать явления, обусловленные только её омическим нагревом и самофокусировочной неустойчивостью мощных радиоволн.

Отметим, что определённые выводы о свойствах механизма генерации искусственных ионосферных неоднородностей можно сделать, используя нагрев ионосферной плазмы в условиях, когда частота волны накачки f_h оказывается выше критической частоты слоя F_2 ионосферы f_{0F_2} для волны соответствующей поляризации (так называемый нагрев «на просвет»). При этом отсутствуют эффекты, связанные с особенностями генерации искусственной турбулентности вблизи высоты отражения волны накачки, но сохраняются эффекты, определяемые омическим нагревом плазмы в поле распространяющейся мощной радиоволны. При воздействии на ионосферу волнами с О-поляризацией показательным также является проход частоты верхнегибридного резонанса через критическую частоту слоя F_2 , т. к. только при условии $f_{UH} = \sqrt{f_h^2 - f_{ce}^2} > f_{0F_2}$ можно говорить о полном прекращении резонансного взаимодействия волн с обыкновенной поляризацией с ионосферной плазмой.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Модификация ионосферной плазмы в условиях резонанса на гармониках гирочастоты электронов

Для определения гирогармонических свойств генерации искусственных ионосферных неоднородностей в области масштабов $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м было проведено несколько циклов измерений в августе 2010–2013 годов и в сентябре 2012 года. Уже первые выполненные измерения показали, что в области частот $f_h < 4f_{ce}$ генерация неоднородностей ослабевает при приближении частоты f_h к $4f_{ce}$, достигает минимума при значениях f_h немного ниже $4f_{ce}$ и быстро восстанавливается с ростом f_h в области $f_h \geq 4f_{ce}$ [4]. Последующие измерения позволили уточнить свойства наблюдаемого явления.

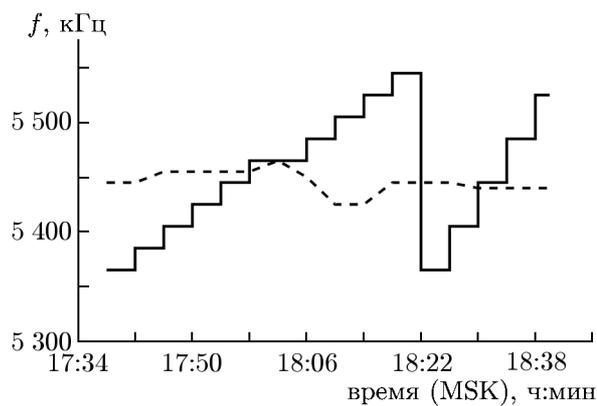


Рис. 1. Временная динамика частоты волны накачки (сплошная линия) и 4-й гармоники гирочастоты электрона (штриховая линия) во время проведения эксперимента 28 августа 2013 года

В качестве примера рассмотрим результаты исследований, проведенных 28 августа 2013 года. В них нагрев ионосферы излучением стенда «Сура» проводился в вечерние часы на частотах, близких к 4-ой гармонике гирочастоты электрона $4f_{ce} \approx 5450$ кГц, что, согласно модели геомагнитного поля [19], для стенда «Сура» соответствует высоте 210 км. В данных экспериментах стенд «Сура» работал в режиме [2 мин — излучение, 2 мин — пауза]. Во время паузы передатчики стенда перестраивались на следующую частоту; пробег по частоте осуществлялся в пределах ± 100 кГц от гармоники гирочастоты электронов. График изменения частоты волны накачки представлен на рис. 1 сплошной линией. Гармоника гирочастоты электронов находилась по

подавлению генерации компоненты DM (down-shifted maximum) в спектре ИРИ, которое во время проведения экспериментов регистрировалось с помощью спектроанализатора «НР3885А» на развёрнутом на стенде «Сура» приёмном пункте. Поведение частоты $4f_{ce}$ во время проведения эксперимента представлено на рис. 1 пунктирной линией. Как видно из рис. 1, во время эксперимента значение частоты волны накачки дважды проходило через $4f_{ce}$. При этом частота f_h изменялась в диапазоне от 5365 до 5545 кГц с шагом в 20 кГц в первом проходе и с шагом 40 кГц — во втором. Во время первого прохода частота волны накачки была близка к $4f_{ce}$ в циклах нагрева с началом в 17:54; 17:58 и 18:02 MSK, во втором — в 18:30 MSK.

Ионограммы, снятые казанским ионозондом во время проведения эксперимента, представлены на рис. 2. На них указаны времена, когда они были получены, и величины отстройек $\delta f = f_h - 4f_{ce}$. Здесь мы рассмотрим только измерения во время второго прохода, поскольку во время измерений с 17:40 до 18:14 MSK наблюдалось появление сильного экранирующего спорадического слоя E_s , что не позволило получить полный ряд данных. К началу второго прохода слой E_s исчез и, начиная с 18:14 MSK, регистрировались достаточно чистые для анализа ионограммы. На рис. 2а изображена ионограмма, снятая в 18:19 MSK, когда частота волны накачки была выше частоты $4f_{ce}$ на 100 кГц. Здесь рассеянный сигнал (РС) регистрировался в области частот зондирования $6 \div 7$ МГц, что соответствовало рассеянию на неоднородностях с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 70$ м в области высот $255 \div 260$ км (высоты определялись из траекторных расчётов [13] по профилям концентрации, восстановленным из соответствующих ионограмм). При переходе на

Таблица 1

δf , кГц	26.08.2013	27.08.2013	28.08.2013	26.08.2010
-80	нет данных	нет данных	слабый РС	нет данных
-40	РС отсутствует	слабый РС	слабый РС	РС отсутствует
-20	РС отсутствует	РС отсутствует	нет данных	РС отсутствует
0	сильный РС	сильный РС	сильный РС	сильный РС
20	очень сильный РС	сильный РС	нет данных	нет данных
40	очень сильный РС	очень сильный РС	сильный РС	очень сильный РС
60	слабый РС	очень сильный РС	нет данных	нет данных

расстройку $\delta f = -80$ кГц (см. рис. 2б, в) слабый рассеянный сигнал был замечен только сразу после включения волны накачки и исчезал при продолжении нагрева ионосферы (так называемый «overshoot-эффект»). При увеличении частоты f_h , соответствующем $\delta f = -40$ кГц, «overshoot-эффект» пропадал и очень слабый рассеянный сигнал становился заметен лишь через некоторое время после включения волны накачки (см. рис. 2д). При значениях $\delta f = -20$ кГц рассеянный сигнал пропадал полностью. При превышении частотой f_h значения $4f_{ce}$ рассеянный сигнал в области зондирующих частот $6 \div 7$ МГц регистрировался регулярно во всём диапазоне $\delta f = 5 \div 100$ кГц, а при отстройках $\delta f = 45$ и 85 кГц рассеянный сигнал принимался ещё и в диапазоне частот $3,5 \div 5,0$ МГц, где он был обусловлен неоднородностями с масштабами $l_{\perp} \approx 100$ м в области высот $270 \div 300$ км (см. рис. 2е, ж, з). На всех ионограммах овалами выделены области, где регистрировался рассеянный сигнал.

Результаты всех наиболее удачных экспериментов, в которых удалось получить значимые результаты, сведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, при значениях частоты f_h ниже $4f_{ce}$ генерация искусственных неоднородностей отсутствовала при $\delta f = -20$ кГц и имела нерегулярный характер для больших отрицательных отстроек, когда рассеянный сигнал был либо слаб, либо регистрировался лишь короткое время сразу после включения волны накачки (проявление «overshoot-эффекта»). С ростом частоты f_h в области $f_h \geq 4f_{ce}$ интенсивность рассеянного сигнала быстро нарастала и при $\delta f = 20 \div 40$ кГц достигала значений, регистрируемых вдали от гармоники гирочастоты электронов. Исключение составили лишь измерения, проведённые 26 августа 2013 года, когда при больших положительных отстройках δf рассеянный сигнал резко ослабевал, что объяснялось развитием спорадического слоя E_s во время проведения эксперимента.

Таким образом, полученные экспериментальные данные демонстрируют явную зависимость интенсивности неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 100$ м от положения частоты волны накачки относительно гармоники гирочастоты электронов. Такая зависимость, отражающая гирогармонические свойства в генерации неоднородностей, как уже отмечалось, прямо свидетельствует о том, что генерация неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50 \div 100$ м должна быть связана с развитием верхнегибридной плазменной турбулентности, результатом которой является развитие мелкомасштабных неоднородностей с $l_{\perp} \leq 50$ м.

2.2. Модификация ионосферной плазмы волнами с X-поляризацией

Свойства искусственных ионосферных неоднородностей с различными масштабами, генерируемых в среднеширотной ионосфере при её модификации волнами с X-поляризацией, исследовались в работе [19]. В ней было показано, что неоднородности с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м могут достаточно эффективно возбуждаться в вечерних и в ночных условиях. Детальное изучение

условий генерации неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 100$ м проводилось в марте, августе и сентябре 2011 и 2012 годов и в сентябре 2013 года. Уровень геомагнитной возмущённости во время этих измерений был немного повышен 26–29 сентября 2011 года и 2–4 сентября 2012 года (значение планетарного суточного индекса геомагнитной активности ΣK_p в эти дни было в пределах $23 \div 32$); в остальные дни геомагнитная активность была очень низкой ($\Sigma K_p \leq 10$). За время этих экспериментов в разное время суток было проведено более 20 циклов измерений с длительностью от 2 до 4 часов каждый с использованием разных режимов периодического излучения мощной радиоволны от [1 мин — излучение, 1 мин — пауза] до [30 мин — излучение, 30 мин — пауза]. Ниже мы рассмотрим результаты этих исследований, основываясь, главным образом, на экспериментах, выполненных в сентябре 2011 года и в марте и августе 2012 года (когда были проведены наиболее длинные циклы измерений и получены более полные наборы данных). Следует отметить, что генерация искусственных ионосферных неоднородностей при нагреве ионосферы волнами с Х-поляризацией регистрировалась, главным образом, только в вечерние и ночные часы.

На рис. 3 представлена серия ионограмм, полученных 30 сентября 2011 года, когда нагрев ионосферы излучением стенда «Сура» осуществлялся на частоте 5 828 кГц в режиме [20 мин — излучение, 20 мин — пауза] в период с 18:50 до 19:50 MSK и [10 мин — излучение, 10 мин — пауза] в период с 20:00 до 21:10 MSK. Эффективная мощность излучения составляла $P_{\text{эфф}} = 130$ МВт. За время сеанса критическая частота для волн с необыкновенной поляризацией $f_{x F_2}$ спадала от 6 600 до 5 500 кГц, оказываясь к концу сеанса ниже частоты волны накачки. Из представленных здесь ионограмм хорошо видно, что, пока выполняется условие $f_x \leq f_{x F_2}$ (рис. 3а–г), рассеянный сигнал обнаруживается во всей полосе частот зондирования: в диапазоне $2 \div 5$ МГц — на действующих высотах $290 \div 330$ км примерно на 50 км выше следа ионограммы вертикального зондирования; в диапазоне $5,3 \div 6,4$ МГц — на высотах $350 \div 400$ км как дополнительный трек, отходящий от О-следа ионограммы; в диапазоне $6 \div 7$ МГц — на высотах $360 \div 500$ км как дополнительный трек, отходящий от её Х-следа. Данные области регистрации рассеянного сигнала помечены на рис. 3б тремя овалами. Интенсивность рассеянных сигналов при переходе к $f_x > f_{x F_2}$ практически не изменяется. Из этого можно заключить, что эти неоднородности действительно возбуждаются волнами с Х-поляризацией, а не остаточным (до $10 \div 15\%$) излучением в О-моду, сопровождающим излучение в Х-моду из-за неидеальности развязки по поляризации излучающей антенной решётки стенда. Интенсивность рассеяния в диапазоне частот $5,3 \div 7,0$ МГц постепенно нарастает при приближении частоты f_x к частоте $f_{x F_2}$ (рис. 3б, в), но исчезает на частотах $2 \div 5$ МГц, для которых рассеяние происходит на высотах между слоями E и F_2 на неоднородностях с масштабами $l_{\perp} \approx 100 \div 200$ м. Это, возможно, связано как с изменением рефракционных условий, приводящих к нарушению условий ракурсности рассеяния, так и с увеличением расстояния от высоты отражения волны накачки до области генерации этих неоднородностей, что может привести к уменьшению эффективности их генерации на таких высотах. Рассеяние перестаёт регистрироваться (интенсивность рассеяния с высот F_2 -области ионосферы резко уменьшается) при переходе к $f_x > f_{x F_2}$, т. е. к нагреву «на просвет» (рис. 3д, е).

Таким образом, полученные результаты ясно указывают на то, что генерация неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м имеет место и при модификации ионосферы мощными радиоволнами с Х-поляризацией, когда отсутствуют эффекты резонансного взаимодействия с плазмой. Также необходимо подчеркнуть, что для их генерации оказывается существенным выполнение условия отражения мощной радиоволны с Х-поляризацией от F_2 -области ионосферы.

Сравнение вычисленных по ионограммам интенсивностей неоднородностей, измеренных в схожих условиях при использовании для модификации ионосферы мощных радиоволн с О- и Х-поляризациями, показывает, что их интенсивность при нагреве Х-волнами только в $3 \div 5$ раз меньше по сравнению с нагревом О-волнами, что совпадает с ранее полученными результата-

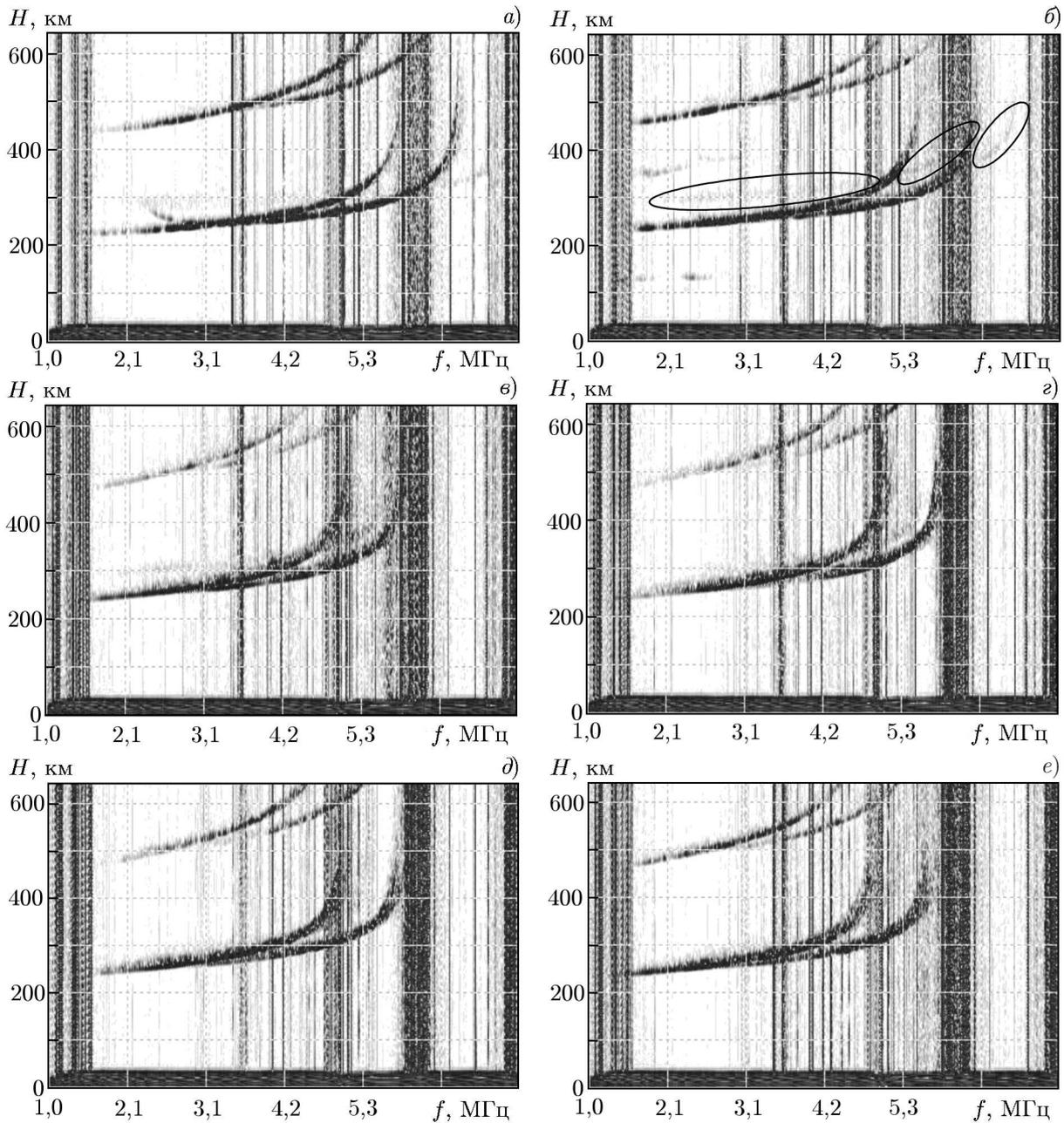


Рис. 3. Серия ионограмм, снятых казанским ионозондом во время проведения эксперимента по нагреву ионосферы волнами с X-поляризацией 30 сентября 2011 года: 18:56 MSK (а), 19:41 MSK (б), 20:46 MSK (в), 20:51 MSK (г), 20:56 MSK (д), 21:01 MSK (е)

ми измерений [20]. Это свидетельствует о том, что при воздействии на ионосферу волнами с O-поляризацией генерация искусственных неоднородностей определяется несколькими механизмами.

Отметим ещё раз, что в представленных в данном параграфе результатах экспериментов, генерация искусственных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м в отсутствие резонансного взаимодействия радиоволн с ионосферной плазмой (при модификации ионосферы мощными радиоволнами с X-поляризацией) наблюдалась только в вечерних и ночных условиях. Это объясняет отсут-

ствие такого эффекта в измерениях для О-моды, описанных в разделе 2.1, где эксперименты проводились в ещё освещённой ионосфере.

2.3. Модификация ионосферной плазмы волнами с О-поляризацией

Рассмотрим особенности рассеяния, а следовательно, и генерации искусственных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м при воздействии на ионосферу мощными радиоволнами с О-поляризацией в условиях, когда с уменьшением критической частоты f_{0F_2} частота волны накачки сначала сравнивается с f_{0F_2} , а потом становится выше неё. При этом при переходе через критическую частоту не наблюдается резкого уменьшения интенсивности рассеянного сигнала; он продолжает регистрироваться вплоть до превышения частотой волны накачки значения f_{0F_2} на $100 \div 200$ кГц, т. е. пока частота верхнегибридного резонанса остаётся меньше критической частоты f_{0F_2} . Подобный характер генерации верхнегибридной турбулентности неоднократно отмечался ранее (см., например, работы [17, 21]).

Выполненные в марте 2014 года исследования воздействия на ионосферу мощными радиоволнами с О-поляризацией также показали, что с переходом от вечерних условий проведения измерений к ночным время релаксации неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м сильно увеличивается. Оно составляет около 1 мин на интервале времени с 20:00 до 23:00 MSK, увеличивается до 2 мин к 24:00 MSK и может составлять десятки минут в полуночные часы, когда наблюдается развитие естественного F-рассеяния на ионограммах вертикального зондирования. Эти результаты прямо указывают на то, что на динамику исследуемых неоднородностей могут влиять неоднородности километровых масштабов как естественного, так и искусственного происхождения. В работе [22] приведены результаты исследования динамики этих неоднородностей при переходе ото дня к ночи на этой же трассе рассеяния. В целом, выводы работы [22] и сделанные из наших измерений заключения хорошо соответствуют друг другу. Замедление релаксации неоднородностей в поздние вечерние и ночные часы авторы работы [22] связывают с увеличением их продольных размеров при переходе от дня к ночи.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволили установить, что генерация искусственных ионосферных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м на высотах F_2 -области ионосферы происходит при модификации ионосферы как мощными радиоволнами с О-поляризацией, так и мощными волнами с Х-поляризацией. В первом случае, наличие у неоднородностей гирогармонических свойств свидетельствует о том, что их генерация должна быть связана с развитием верхнегибридной плазменной турбулентности и возбуждением мелкомасштабных ($l_{\perp} \leq 50$ м) неоднородностей. В случае волн с Х-поляризацией резонансное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой невозможно и генерация этих неоднородностей должна определяться омическим нагревом плазмы и самофокусирующей неустойчивостью пучка мощных радиоволн.

Таким образом, можно считать доказанным существование по крайней мере двух механизмов генерации искусственных ионосферных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м в области F_2 ионосферы вблизи уровня отражения мощной радиоволны. Напомним, что эти масштабы в спектре искусственных ионосферных неоднородностей лежат между спектральным максимумом в области $l_{\perp} \approx 50$ м, связанным с развитием мелкомасштабных неоднородностей в результате развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости, и максимумом в области $l_{\perp} \approx 500$ м, обусловленным самофокусирующей неустойчивостью пучка мощных радиоволн. В первом случае развитие параметрической неустойчивости возможно только при модификации

ионосферы мощными радиоволнами с О-поляризацией. Во втором случае образование неоднородностей имеет место при использовании волн обеих поляризаций, однако расслоение плазмы происходит более интенсивно в случае волн с О-поляризацией из-за более сильного её нагрева мощной радиоволной и влияния эффекта «магнитного зенита» [23]. Подчеркнём, что в обоих случаях наличие отражения волны накачки в земной ионосфере существенно влияет на развитие этих неустойчивостей. Можно предположить, что генерация неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 50 \div 200$ м происходит за счёт нелинейной перекачки [24] по спектру турбулентности как со стороны спектрального максимума в области $l_{\perp} \approx 50$ м, так и со стороны максимума в области $l_{\perp} \approx 500$ м. По крайней мере, это не противоречит всем имеющимся на сегодня экспериментальным данным о рассмотренных в настоящей работе свойствах этих неоднородностей.

Отдельно следует рассматривать механизм генерации неоднородностей с масштабами $l_{\perp} \approx 100 \div 200$ м на высотах $100 \div 150$ км. В работах [25–28] было показано, что эти неоднородности не могут появиться за счёт прорастания от высоты отражения мощной радиоволны, где имеет место генерация наиболее интенсивной искусственной ионосферной турбулентности и развитие искусственных ионосферных неоднородностей с различными масштабами. Судя по результатам работы [28], эти неоднородности появляются на таких низких высотах практически сразу с развитием неоднородностей на высотах F_2 -области ионосферы. Их образование, скорее всего, связано с генерацией неоднородностей в слое E ионосферы, механизм которой в настоящее время ещё до конца не изучен. Здесь ещё только предстоит выполнить экспериментальные и теоретические исследования.

Авторы выражают благодарность сотрудникам стенда «Сура» за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Работа Фролова В. Л., Акчурина А. Д. и Зыкова Е. Ю. выполнена за счёт средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Работа Болотина И. А. выполнена при поддержке РФФ (грант 14–12–00556) в части обработки и анализа полученных экспериментальных данных. Большинство экспериментов по программе исследований было проведено в 2010–2013 годы при финансовой поддержке ФЦП «Геофизика» и РФФИ (гранты 11–02–00374, 12–02–31839, 12–05–33065, 13–05–01122, 13–05–00511, 13–02–12074, 13–02–12241).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
2. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Metelev S. A., Sergeev E. N. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59, No. 18. P. 2317.
3. Allen E. M., Thome G. D., Rao P. V. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 905.
4. Minkoff J. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 997.
5. Грач С. М., Караштин А. Н., Митяков Н. А. и др. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. С. 1321; 1330.
6. Васьков В. В., Гуревич А. В. // Журн. exper. теор. физ. 1975. Т. 69, С. 176.
7. Das A. C., Fejer J. A. // J. Geophys. Res. 1979. V. A84. P. 6701.
8. Литвак А. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11. С. 1433.
9. Perkins F. W., Valeo E. J. // Phys. Rev. Lett. 1974. V. 32. P. 1234.
10. Васьков В. В., Гуревич А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. С. 1261.

11. Ерухимов Л. М., Комраков Г. П., Фролов В. Л. // Геомагнетизм и аэрономия. 1980. Т. 20, № 6. С. 1112.
12. Zabolotin N. A., Bronin A. G., Zhabankov G. A., et al. // Radio Sci. 2002. V. 37, No. 6. P. 1102.
13. Болотин И. А., Фролов В. Л., Акчурин А. Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 66.
14. Грач С. М., Тиде Б., Лейзер Т. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 5. С. 617.
15. Frolov V. L., Sergeev E. N., Ermakova E. N., et al. // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28, No. 16. P. 3103.
16. Sergeev E. N., Frolov V. L., Grach S. M., Kotov P. V. // Advances Space Res. 2006. V. 38. P. 2518.
17. Leyser T. B. // Space Sci. Rev. 2001. V. 98. P. 223.
18. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 684 с.
19. http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/igrf_vitmo.php
20. Фролов В. Л., Болотин И. А., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 6. С. 437.
21. Blagoveshchenskaya N. F., Carlson H. C., Kornienko V. A., et al. // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 131.
22. Сергеев Е. Н., Зыков Е. Ю., Акчурин А. Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 79.
23. Гуревич А. В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
24. Филипп Н. Д., Блаунштейн Н. Ш., Ерухимов Л. М. и др. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. Кишинев: Штииница, 1991. 287 с.
25. Бахметьева Н. В., Гончаров Н. П., Игнатьев Ю. А., Коротина Г. С. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 5. С. 799.
26. Бахметьева Н. В., Дмитриев С. А., Игнатьев Ю. А., Шавин П. Б. // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32, № 3. С. 180.
27. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Вяхирев В. Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 5–6. С. 338.
28. Бахметьева Н. В., Фролов В. Л., Вяхирев В. Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 106.

Поступила в редакцию 27 июля 2015 г.; принята в печать 8 марта 2016 г.

ON THE FEATURES OF GENERATION OF ARTIFICIAL IONOSPHERIC IRREGULARITIES WITH TRANSVERSE SCALES OF 50–200 m

I. A. Bolotin, V. L. Frolov, A. D. Akchurin, and E. Yu. Zykov

We consider the features of generation of artificial ionospheric irregularities with transverse (to the geomagnetic field) scales $l_{\perp} \approx 50\text{--}200$ m in the ionosphere modified by high-power HF radio waves. It was found that there are at least two mechanisms of generation of these irregularities in the ionospheric F region. The first mechanism is related to the resonant interaction between radio waves and the ionospheric plasma, while the second one takes place even in the absence of the resonant interaction. Different polarization of the high-power radiation was used to separate the mechanisms in the measurements.

И. А. Болотин, В. Л. Фролов, А. Д. Акчурин, Е. Ю. Зыков

1097