

УДК 550.388:533.951+573.868

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫМИ РАДИОВОЛНАМИ С Х-ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ НА ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ И НАБЛЮДАЕМЫХ ПРИ ЭТОМ ЭФФЕКТАХ

В. Л. Фролов

Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Представлен обзор полученных к настоящему времени экспериментальных результатов по модификации ионосферы Земли мощными радиоволнами Х-поляризации. Показано, что влияние такого нагрева на генерацию искусственной ионосферной турбулентности имеет сложный характер и по-разному проявляется в различных областях ионосферы и при разных условиях проведения экспериментов. Обсуждаются предложенные к настоящему времени механизмы генерации плазменных возмущений при нагреве ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации.

ВВЕДЕНИЕ

Уже в первых экспериментах по воздействию на ионосферную плазму мощным коротковолновым (КВ) радиоизлучением от специально построенных нагревных стендов было обнаружено, что наиболее сильные эффекты наблюдаются тогда, когда для нагрева плазмы используются электромагнитные волны с обыкновенной (О) поляризацией [1, 2]. Это связано с возможностью взаимодействия мощных радиоволн с О-поляризацией с плазмой в областях плазменных резонансов (называемого далее резонансным взаимодействием), что приводит, в конечном итоге, к генерации интенсивной искусственной ионосферной турбулентности вблизи уровня отражения волны накачки [3].

Поскольку волны с необыкновенной (Х) поляризацией отражаются ниже уровня плазменных резонансов, их воздействие на ионосферу, как считалось, ограничивается омическим нагревом плазмы [4], инициированием самофокусировочной неустойчивости, приводящей к генерации искусственных ионосферных неоднородностей концентрации плазмы с масштабами $l_{\perp} \geq 0,1$ км (где l_{\perp} — размер неоднородностей поперёк геомагнитного поля) [5], и формированием решётки возмущений концентрации плазмы в поле стоячей волны, образованной падающей и отражённой от ионосферы мощными электромагнитными волнами [6]. Ранее предполагалось, что все эти эффекты вызывают генерацию лишь достаточно слабой искусственной ионосферной турбулентности. Поэтому долгое время они не привлекали должного внимания исследователей и подробно не анализировались.

Однако выполненные в 1993–1995 годах эксперименты с дополнительным нагревом ионосферной плазмы мощными волнами с Х-поляризацией показали, что такой подогрев значительно ослабляет искусственную турбулентность, возбуждаемую мощной волной О-поляризации [7]. С тех пор нагреву ионосферы мощными радиоволнами с Х-поляризацией стало уделяться более пристальное внимание. За последние годы выполнен ряд целенаправленных экспериментальных работ по этой проблеме и накоплен обширный экспериментальный материал, требующий анализа и обобщения.

В настоящей работе анализируется вся совокупность данных, которые получены в экспериментах с нагревом ионосферы мощными волнами Х-поляризации на нагревных стендах «Сура» (г. Нижний Новгород, Россия), EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия), Boulder (Колорадо,

США) и HAARP (Аляска, США). Её цель — прояснить физическую природу наблюдаемых явлений и определить возможности их влияния на развитие различных компонент искусственной ионосферной турбулентности. В работе также обсуждаются изменяющиеся неопределённости в интерпретации экспериментальных данных и пути развития этих исследований.

1. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ К НАСТОЯЩЕМУ ВРЕМЕНИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1.1. Нагрев ионосферной плазмы мощными радиоволнами

Мощное радиоизлучение КВ диапазона, проходя через ионосферу, нагревает плазму и изменяет её среднюю температуру в пределах диаграммы направленности антенны передатчика [4, 8]. Кроме того, в области плазменных резонансов имеет место аномальное поглощение энергии мощной радиоволны О-поляризации, сопровождающееся интенсивным локальным разогревом плазмы [3]. Изменение температуры электронов T_e в силу различных причин вызывает модуляцию средних значений концентрации плазмы, что, в свою очередь, может заметно влиять на радиоволны, распространяющиеся через возмущённую область ионосферы, и обуславливать их нелинейную рефракцию и самофокусировку [3, 9–11].

Теория распространения радиоволн в ионосфере с учётом нагревной нелинейности детально разработана в [11]. Как показывают расчёты, возмущение электронной температуры T_e зависит от мощности, частоты и поляризации волны накачки, времени суток и ионосферных условий, а также от высоты локализации этих возмущений в ионосфере. Так в нижней ионосфере в D - и E -областях температура электронов может изменяться на десятки процентов от своего фонового уровня. Это сильно влияет на поглощение энергии мощной радиоволны на этих высотах, а следовательно — на транспорт энергии волны накачки в верхнюю ионосферу, т. е. её F -область.

Особенно это касается мощных радиоволн с напряжённостью электрического поля $E_0 > 0,5E_{\text{пл}}$, где $E_{\text{пл}} = 4,5 \cdot 10^{-3} [\delta_0 T (\omega^2 + \nu_{e0}^2)]^{1/2}$ мВ/м — характерное плазменное поле [11]; здесь T — температура плазмы в эВ, ω — циклическая частота поля, ν_{e0} — эффективная частота столкновений электрона с молекулами и ионами, δ_0 — средняя доля энергии, теряемая электроном при одном соударении. При частоте волны накачки $f_{\text{ВН}} \approx 5$ МГц примерное равенство $E_0 \approx 0,5E_{\text{пл}}$ достигается в нижней ионосфере при эффективной мощности излучения $P_{\text{эфф}} \approx 100$ МВт. При такой напряжённости электрического поля E наблюдается эффект «насыщения», когда поглощение электромагнитной волны резко увеличивается с ростом её амплитуды, так что интенсивность прошедшего в глубину плазмы излучения перестаёт зависеть от мощности падающей на ионосферу волны. Эффекты самовоздействия волны накачки в нижней ионосфере вследствие увеличения температуры электронов наблюдались, например, в [12, 13].

В верхней ионосфере (т. е. в её F_2 -области на высотах $h \approx 250 \div 400$ км) характерные длины диффузии L_N и теплопроводности L_T достигают десятков и даже сотен километров и сравниваются по порядку величины с пространственным масштабом неоднородности слоя плазмы. Здесь теплопроводность и диффузия в плазме играют определяющую роль при формировании области возмущений T_e , которые регистрируются в широком высотном интервале. Область отражения волны накачки выделена как развитием параметрических неустойчивостей вблизи уровня отражения мощной радиоволны с О-поляризацией, так и тем, что здесь амплитуда электрического поля электромагнитного излучения может возрасти в несколько раз за счёт эффекта разбуждения [4]. Это также приводит к усилению возмущений температуры T_e в этой области даже в отсутствие неустойчивостей. Последнее, хотя и в несколько меньшей степени, имеет место и в случае волн Х-поляризации. Ясно, что существенный омический нагрев F -области ионосферы

возможен только при отсутствии значительного поглощения электромагнитного излучения в её нижних D - и E -слоях.

Характерное время установления температуры $\tau_T \approx (\delta\nu)^{-1}$, где ν — частота столкновений электронов с ионами и электрически нейтральными частицами, δ — доля теряемой ими при соударении энергии, сильно зависит от времени суток и высоты h и составляет $10 \div 100$ мкс для $h \approx 60 \div 90$ км (D -слой), $5 \div 100$ мс для $h \approx 100 \div 120$ км (E -слой) и $5 \div 30$ с для $h \approx 200 \div 300$ км (F_2 -слой) [11].

В работе [1] было показано, что мощное КВ радиоизлучение с O - или X -поляризацией, проходя через нижнюю ионосферу, разогревает электроны плазмы и в результате увеличивает своё поглощение, а также поглощение пробных волн, зондирующих возмущённую область ионосферы. Эти эффекты максимальны в полдень, когда концентрация плазмы в D - и E -слоях максимальна. Как показали измерения, в спокойных геомагнитных условиях поглощение мощной радиоволны может достигать 3 дБ при её мощности порядка 100 МВт и зависит от её поляризации и частоты. Хорошо известно, что разогрев плотных D - и E -слоёв мощной радиоволной как с O -, так и X -поляризацией приводит к кроссмодуляции сигналов от сверхдлинноволновых станций, распространяющихся над мощными радиопередатчиками или нагревными стендами [4, 14].

Согласно [4, 11] нагрев нижней ионосферы волнами с X -поляризацией должен быть более эффективным по сравнению с нагревом волнами с O -поляризацией и должен возрастать с уменьшением частоты волны накачки. Однако полученные в [1] результаты показывают, что это не так: в ряде измерений воздействие волнами с O -поляризацией, когда они отражались в F_2 -области ионосферы, приводило к более эффективной кроссмодуляции, чем воздействие волнами с X -поляризацией, даже когда последние имели более низкую частоту. Более того, воздействие волнами с O -поляризацией в условиях, когда их частота была ниже критической частоты E -слоя, вызывало появление сильного спорадического E -слоя, а иногда и слоя E_{spread} , чего никогда не наблюдалось при воздействии волнами с X -поляризацией. Также было обнаружено, что при коротких порядка 1 с воздействиях ослабление радиоволн в ионосфере продолжалось не более 20 мс, как это и следует из теоретических представлений. Однако после длительного (10 мин и больше) нагрева дополнительное поглощение в ионосфере релаксировала за время порядка 10 мин.

Принимая во внимание вышеизложенные экспериментальные факты, авторы [1] пришли к выводу, что нижняя ионосфера является своего рода «нелинейным аттенуатором». В ней под воздействием мощной радиоволны развиваются сразу несколько процессов, часть из которых увеличивают ослабление, а другие — уменьшают его. Они заключили также, что нагрев плазмы в пределах диаграммы направленности излучения волны накачки и возбуждение искусственной ионосферной турбулентности в F -области верхней ионосферы вблизи точки её отражения должны каким-то образом влиять на нагревные эффекты в нижней ионосфере. Природа этих процессов осталась в [1] необъяснённой.

Дополнительно отметим, что увеличение температуры электронов в D -области влияет на атмосферные химические реакции и приводит, например, к сильной зависимости частичного радиоотражения от высоты [14], к уменьшению радиоотражения на мезосферных высотах [15] и к уменьшению интенсивности излучения в линии озона на частоте порядка 110 ГГц [16].

Рассмотрим результаты нескольких целенаправленных экспериментов по исследованию эффектов, возникающих при омическом нагреве ионосферной плазмы мощным КВ радиоизлучением с O - или X -поляризацией. В экспериментах использовались различные методы диагностики создаваемых плазменных возмущений.

Начнём с анализа измерений на стенде EISCAT/Heating, в которых ионосфера нагревалась волнами с X -поляризацией с мощностью порядка 180 МВт на частоте 4,04 МГц [17]. Эксперименты выполнялись в октябре 2006 года. Нагрев вечерней или ночной ионосферы осуществлялся в

режиме 2 мин — излучение, 2 мин — пауза. Для выделения чисто омического нагрева волнами с Х-поляризацией и уменьшения влияния различного рода сопутствующих эффектов, связанных с влиянием положения точки отражения и формирования стоячей волны, воздействие осуществлялось на частоте волны накачки, которая превышала критическую частоту F_2 -слоя ионосферы f_{xF_2} , т. е. $f_{\text{ВН}} > f_{xF_2}$. Возмущения температуры плазмы диагностировались с помощью радара некогерентного рассеяния, работающего на частоте 933 МГц и расположенного рядом с нагревным стендом.

Эти эксперименты показали, что наибольшее увеличение температуры электронов на $300 \div 400$ К, т. е. на $30 \div 40\%$ от её фонового значения, наблюдалось на высотах $230 \div 240$ км; рост температуры электронов имел характерное время $10 \div 20$ с и за несколько меньшее время возмущения T_e релаксировали. Измерения показали также отсутствие изменения температуры ионов во время нагрева ионосферной плазмы. В целом моделирование вариаций температуры T_e позволило сделать заключение о хорошем соответствии экспериментальных данных и теоретических оценок. Согласно этим расчётам, для эффективной мощности излучения на стенде HAARP $P_{\text{эфф}} \approx 1 \div 3$ ГВт температура T_e может увеличиваться над своим фоновым уровнем на 150% .

В октябре 2008 года на нагревном стенде EISCAT/Heating были проведены новые измерения вариаций температуры плазмы при её нагреве мощными радиоволнами «на просвет», когда частота $f_{\text{ВН}} > f_{xF_2}$ [18]. Измерения выполнялись на шести частотах волны накачки в диапазоне $5,35 \div 7,95$ МГц с эффективной мощностью излучения $P_{\text{эфф}} = 450 \div 870$ МВт (большая мощность соответствовала более высоким частотам волны накачки) в условиях, когда критическая частота ионосферы f_{xF_2} плавно уменьшалась от 5,4 до 4,0 МГц. Вечерняя ионосфера нагревалась в режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза. В трёх сеансах для сравнения нагрев проводился волнами с О-поляризацией. Возмущения температуры плазмы, как и в предыдущем случае, диагностировались с помощью радара некогерентного рассеяния.

Выполненные эксперименты показали, что на высотах F_2 -области порядка $200 \div 270$ км температура электронов увеличивается с 2000 К до 2800 К для волны накачки с Х-поляризацией с наименьшей частотой 5,35 МГц. Более слабые возмущения температуры регистрировались в диапазоне высот примерно от 150 до 350 км. С ростом частоты волны накачки величина увеличения температуры T_e уменьшалась, также как и с переходом на нагрев волнами с О-поляризацией. Не было обнаружено каких-либо изменений в температуре ионов и в скорости их дрейфа. Такая постановка эксперимента позволила достаточно просто провести моделирование амплитуды увеличения температуры T_e в зависимости от частоты и поляризации мощной радиоволны, которое показало полное соответствие результатов расчёта и экспериментальных данных. Эти измерения однозначно продемонстрировали, что даже нагрев ионосферной плазмы на просвет мощными волнами с Х-поляризацией может заметно (до 40%) увеличивать температуру электронов на высотах F_2 -области ионосферы.

Эксперименты по сравнению эффективности нагрева дневной ионосферной плазмы волнами с Х- и О-поляризацией, излучаемыми на частоте $f_{\text{ВН}} = 3,2$ МГц ($f_{\text{ВН}} < f_{oF_2}$) при полной подводимой к антенне мощности $P_0 = 3,6$ МВт, были проведены на стенде HAARP 18 марта 2009 года с 20:45 до 22:50 UT [19]. Возникающие плазменные возмущения диагностировались с помощью развёрнутых на стенде цифрового ионозонда и магнитометра. В этих экспериментах было установлено, что с началом нагрева ионосферы волной с О-поляризацией уменьшаются действующие высоты отражения зондирующих радиоволн на частотах $2,5 \div 4,0$ МГц и образуется слой F_{spread} . После включения излучения волны накачки с Х-поляризацией, наоборот, действующие высоты отражения зондирующих радиоволн увеличиваются, а также появляются индуцированные нагревом флуктуации магнитного поля, заметно более интенсивные, чем при излучении волн с О-поляризацией.

В работе [19] была дана следующая интерпретация наблюдаемых явлений. Модификация ионосферной плазмы волнами с O-поляризацией при их отражении в ионосфере приводит к аномально сильному локальному разогреву электронов плазмы вблизи высоты отражения волны накачки, когда их температура T_e может увеличиться в несколько раз. Вследствие теплопроводности тепло переносится вверх и вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля. В последнем случае это приводит к движению плазмы вниз, которое и регистрируется с помощью ионозонда. Омический разогрев плазмы более интенсивен для волн с X-поляризацией. Однако он является нелокальным и приводит, главным образом, к выталкиванию плазмы вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля, что и было зарегистрировано ионозондом. Из-за конечности диаметра пучка мощных радиоволн появляется сила теплового давления \mathbf{F}_T при нагреве плазмы, которая выталкивает электроны из области с более высокой их температурой. Сила \mathbf{F}_T имеет горизонтальную составляющую, что приводит к дрейфу электронов в направлении $[\mathbf{F}_T, \mathbf{B}_0]$, и одновременно появляются вариации геомагнитного поля \mathbf{B}_0 и крупномасштабные неоднородности концентрации плазмы. Поскольку, как отмечалось выше, омический нагрев более эффективен для волн с X-поляризацией, в этом случае вариации геомагнитного поля будут более интенсивными. Помимо указанных выше явлений, самофокусировочная неустойчивость приводит к генерации неоднородностей плазмы с поперечным размером $l_{\perp} \geq 0,1$ км, более интенсивной для мощных волн с O-поляризацией (из-за их резонансного взаимодействия с плазмой), чем для волн с X-поляризацией, что приводит к образованию F_{spread} на ионограммах.

1.2. Изменение концентрации плазмы при её нагреве мощным КВ радиоизлучением

Известны три основных механизма, приводящих к изменению электронной концентрации N_e при воздействии мощных радиоволн на ионосферу [11]: 1) нарушение ионизационно-рекомбинационного баланса из-за температурной зависимости коэффициента диссоциативной рекомбинации; 2) выталкивание плазмы из областей её наибольшего разогрева и 3) стимулированная ионизация ускоренными электронами. Первый и третий механизмы увеличивают ионизацию и концентрацию N_e , а второй уменьшает N_e . Эффективность каждого механизма различна на разных высотах и определяется также временем суток, параметрами мощной радиоволны и ионосферными условиями.

Механизм нарушения ионизационно-рекомбинационного баланса наиболее эффективен в нижней ионосфере, где процессы переноса в плазме малосущественны и увеличение температуры электронов приводит к увеличению концентрации N_e . Вследствие изменения с высотой состава нейтральной компоненты ионосферы, рассматриваемый эффект не наблюдается в F_2 -области.

Увеличение концентрации ионосферной плазмы в результате нарушения ионизационно-рекомбинационного баланса при нагреве ионосферы мощной радиоволной было экспериментально установлено и исследовано в [20]. При мощности волны накачки $P_{\text{эфф}} \approx 200$ МВт концентрация N_e в дневной ионосфере на высотах $h \approx 130 \div 150$ км увеличивалась примерно на $10 \div 20$ % от невозможного уровня с характерными временами роста и релаксации возмущения N_e порядка $30 \div 40$ с. Для нагрева ионосферы использовались волны с X-поляризацией в условиях их отражения в ионосфере или волны обеих поляризаций при нагреве на просвет. Горизонтальные размеры такого возмущения концентрации плазмы определялись диаметром пучка мощных радиоволн. Возникающая крупномасштабная неоднородность электронной концентрации может рассматриваться как дефокусирующая линза, способная ослабить на $10 \div 20$ дБ плотность потока энергии проходящих через неё радиоволн на уровне их отражения в F_2 -области ионосферы. Это, естественно, уменьшит интенсивность волны накачки на уровне её отражения и существенно повлияет на развитие там параметрических неустойчивостей.

На высотах D -области (меньше 80 км) определяющими являются процессы фотоотлипания и прилипания электронов к молекулам, скорость которых увеличивается с ростом температуры T_e , так что высокочастотный нагрев плазмы сопровождается падением концентрации N_e с характерным временем $\tau \leq 1$ с [6, 21]. Этот процесс лежит в основе образования искусственных периодических неоднородностей в D -области ионосферы.

На высотах F_2 -области больше 200÷250 км быстрый разогрев электронов плазмы нарушает баланс давления и в последующем приводит к более медленному диффузионному выталкиванию плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля из областей её наибольшего разогрева. Такого рода эффекты исследовались многократно (см., например, [8, 11, 22]). Как отмечалось выше, в отличие от волн с X -поляризацией, гораздо более эффективный локальный разогрев плазмы волнами с O -поляризацией вблизи точки их отражения за счёт развития различного типа параметрических неустойчивостей и генерации интенсивных плазменных колебаний приводит к ускорению электронов до сверхтепловых скоростей [3, 23–25], дополнительной ионизации плазмы и искусственному оптическому свечению атмосферы (см., например, [22, 26, 27]).

В последнее время для объяснения явлений, связанных с нагревом плазмы в пределах диаграммы направленности радиоизлучения, стал рассматриваться эффект выталкивания плазмы из пучка мощных радиоволн за счёт силы светового давления [28, 29]. Подробнее влияние этого эффекта будет рассмотрено в разделе 2 настоящей работы.

1.3. Генерация искусственных неоднородностей плазмы мощными радиоволнами с X -поляризацией в F_2 -области ионосферы

Одним из наиболее значимых эффектов, обнаруженных при воздействии мощным КВ радиоизлучением с O -поляризацией на ионосферу в условиях его резонансного взаимодействия с плазмой, является генерация неоднородностей её концентрации с размерами поперёк геомагнитного поля l_{\perp} от долей метра до десятков километров. Однако генерация искусственных ионосферных неоднородностей с размером $l_{\perp} \geq 10$ м наблюдается и при использовании волн с X -поляризацией. Анализ особенностей генерации таких неоднородностей посвящён данный раздел работы.

1.3.1. Генерация среднemasштабных ($l_{\perp} \approx 0,1 \div 1$ км) искусственных ионосферных неоднородностей мощными радиоволнами с X -поляризацией

Как хорошо известно, среднemasштабные неоднородности ионосферной плазмы определяют появление F -рассеяния (слоя F_{spread}) на ионограммах вертикального зондирования ионосферы. Характеристики искусственного слоя F_{spread} были наиболее полно измерены в начале 70-х годов на стенде Боулдер (США) [1, 30]. Эти эксперименты показали, что нагрев ионосферы мощными радиоволнами с O -поляризацией с мощностью $P_{\text{эфф}} \approx 100$ МВт приводит к генерации интенсивного слоя F_{spread} как в дневных, так и особенно в вечерних и ночных условиях. Воздействие мощными радиоволнами с X -поляризацией также вызывает возбуждение слоя F_{spread} , но меньшей интенсивности и преимущественно в вечерней и ночной ионосфере. В этих экспериментах было обнаружено также, что нагрев верхней ионосферы волнами с X -поляризацией приводит к появлению широкополосного ослабления интенсивности отражённых от ионосферы пробных волн на частотах порядка и несколько выше частоты волны накачки.

Среднemasштабные искусственные неоднородности с поперечным размером $l_{\perp} \approx 0,1 \div 1$ км определяют в значительной мере свойства F -рассеяния и широкополосного ослабления отражённых от ионосферы пробных волн. Их генерация происходит за счёт самофокусирующей неустойчивости мощных радиоволн [5, 31]. В статье [5] по сравнению с более ранними теоретиче-

скими работами было учтено наличие узких по высоте областей интенсивного разогрева плазмы за счёт резонансного поглощения основной доли энергии мощной радиоволны с О-поляризацией в областях плазменного или верхнегибридного резонансов. Это объясняет более интенсивное F -рассеяние при использовании волн с О-поляризацией по сравнению с нагревом ионосферы волнами с Х-поляризацией. Появление более крупномасштабных неоднородностей с размерами в несколько километров и больше связывается с усилением естественных флуктуаций концентрации плазмы при их разогреве мощной радиоволной за счёт различного рода отмеченных ранее эффектов [32].

Важным шагом в определении природы наблюдаемых при нагреве ионосферы волнами с Х-поляризацией явлений явились эксперименты по зондированию возмущённой области ионосферы пробными волнами с Х-поляризацией в широком диапазоне частот, выполненные на стенде «Сура» в 1999–2001 годах [33]. Основой этих экспериментов явились результаты, полученные ранее на стенде «Зимёнки» [34], продемонстрировавшие, что волны с Х-поляризацией могут эффективно рассеиваться на среднемасштабных неоднородностях концентрации плазмы с поперечным размером $l_{\perp} \approx 0,1 \div 1$ км без изменения поляризации.

Представленные в [33] эксперименты были выполнены в вечерние и ночные часы для того, чтобы избежать большого поглощения энергии мощной радиоволны в нижней ионосфере, т. е. её D - и E -областях. Использовались длинные ($2 \div 5$ мин) интервалы нагрева с целью обеспечить достаточно полное развитие рассеивающих неоднородностей концентрации плазмы и длительные ($7 \div 10$ мин) паузы между ними для того, чтобы каждое следующее включение выполнялось в условиях «невозмущённой ионосферы», т. е. в условиях «холодного старта». Было установлено, что при максимальной мощности нагревной волны порядка 150 МВт на частоте 5 752 кГц и порядка 250 МВт на частоте 7 815 кГц уменьшается амплитуда отражённых от ионосферы сигналов как для самой волны накачки (на $5 \div 10$ дБ), так и пробных волн. Ослабление пробных волн зависит от их частоты $f_{ПВ}$, достигает максимального значения $6 \div 10$ дБ при $f_{ПВ} \approx f_{ВН}$ и уменьшается в среднем с увеличением частоты $f_{ПВ}$, а также с уменьшением мощности волны накачки. При максимальной мощности волны накачки ослабление пробных радиоволн в возмущённой области ионосферы развивается и релаксирует за характерные времена $5 \div 40$ с и $20 \div 50$ с соответственно. Выполненные эксперименты позволили в приближении теории многократного рассеяния [33, 35] оценить поперечный размер рассеивающих неоднородностей $l_{\perp} \approx 0,1 \div 1$ км и показать, что эти неоднородности могут занимать высотный интервал до 40 км около уровня отражения мощной радиоволны. Амплитуда этих неоднородностей электронной концентрации при мощности волны накачки $P_{эфф} \approx 150 \div 200$ МВт оценивалась величиной порядка 0,5 %.

1.3.2. Генерация мелкомасштабных (декаметровых) искусственных ионосферных неоднородностей мощными радиоволнами с Х-поляризацией

Первые попытки определить возможность генерации мелкомасштабных искусственных неоднородностей плазмы при нагреве F_2 -области ионосферы мощными радиоволнами с Х-поляризацией были предприняты на стенде EISCAT в 1981 году в ранние вечерние часы [36]. Использовался метод ракурсного (брэгговского) рассеяния радиоволн. Последний позволяет легко контролировать такие характеристики искусственных ионосферных неоднородностей, как их амплитуда, характерные времена развития и релаксации, скорости движения. Было получено, что при нагреве ионосферы волнами с Х-поляризацией мелкомасштабные (декаметровые) неоднородности не возбуждались.

Более целенаправленные измерения были проведены на стенде EISCAT в мае и июне 1995 года около 15:00 UT ещё в освещённой (в дневной) ионосфере [37]. Волна накачки имела эффектив-

ную мощность порядка 200 МВт, отражалась на высоте около 200 км. Возмущённая область ионосферы зондировалась расположенным в Финляндии КВ радаром системы CUTLASS с рабочей частотой 18 МГц, что давало возможность контролировать неоднородности с поперечным размером $l_{\perp} \approx 8,3$ м.

Попеременный нагрев волнами с О- и Х-поляризацией и с одной и той же частотой продемонстрировал, что мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности, вызывающие ракурсное рассеяние и аномальное ослабление зондировавших возмущённую область ионосферы пробных волн с О-поляризацией, возбуждались только при воздействии мощными радиоволнами с О-поляризацией. Одновременные измерения с помощью радара некогерентного рассеяния показали лишь небольшое (на 100 К) увеличение температуры электронов при нагреве волнами с О-поляризацией, в то время как при воздействии волнами с Х-поляризацией никакого увеличения электронной температуры T_e вообще не наблюдалось. Это может свидетельствовать о слабом нагреве ионосферной плазмы мощными радиоволнами в этом эксперименте.

Совершенно иная ситуация имела место в экспериментах [38, 39], выполненных на стенде EISCAT в ноябре 2009 года и в марте 2010 года. Они отличались тем, что проводились в поздние вечерние часы, когда волна накачки с Х-поляризацией отражалась вблизи максимума F_2 -слоя ионосферы. При этом частота волны $f_{\text{ВН-О}}$ превышала критическую частоту ионосферы $f_{\text{о}F_2}$ более, чем на 0,5 МГц, и волна с О-поляризацией, сопутствующая волне с Х-поляризацией из-за не идеальности развязки по поляризациям, не отражалась от ионосферы и не могла вызвать генерацию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей за счёт развития параметрических неустойчивостей. Эти измерения проводились в очень спокойных геомагнитных условиях. Частоты зондирования КВ радара CUTLASS были равны 10, 13 и 18 МГц, что давало возможность контролировать динамику неоднородностей с поперечным размером $l_{\perp} \approx 15, 12$ и 8 м соответственно. В этих измерениях наблюдалось сильное рассеяние через 1–3 мин после начала воздействия на ионосферу мощной радиоволной с Х-поляризацией, сравнимое с интенсивностью рассеяния при нагреве волной с О-поляризацией. Это рассеяние отличалось длительной релаксацией, занимавшей 20–30 мин, что намного дольше релаксации (порядка десятков секунд) ракурсного рассеяния на таких неоднородностях при нагреве ионосферы волнами с О-поляризацией. Другой его особенностью является то, что рассеяние регистрировалось только при очень большой мощности волны накачки $P_{\text{эфф}} \geq 100$ МВт. Измеренный в этих экспериментах диаметр области рассеяния 60–120 км соответствует диаметру области ионосферы, засвеченной диаграммой направленности антенны нагревного стенда.

В этих экспериментах с помощью станции некогерентного рассеяния измерялась также температура электронов. Было установлено, что омический нагрев плазмы волной с Х-поляризацией в условиях её отражения вблизи максимума F_2 -слоя ионосферы увеличивал температуру T_e на 50% вблизи уровня отражения, что больше, чем увеличение температуры T_e на 17% при нагреве волнами с О-поляризацией на просвет. С помощью некогерентного рассеяния было также установлено, что нагрев плазмы мощными волнами с Х-поляризацией приводил к возрастанию электронной концентрации на величину до 25% от её невозмущённого значения в широком интервале высот от 230 до 400 км, т. е. на высотах, больших, чем высота 220 км максимального разогрева плазмы.

Все полученные в этих экспериментах результаты говорят о том, что генерация дециметровых неоднородностей должна определяться нагревом плазмы в пределах диаграммы направленности передающей антенны стенда. При этом необходимо допускать, что существенным фактором является отражение волны с Х-поляризацией вблизи максимума F_2 -слоя ионосферы, что должно усиливать разогрев электронов вблизи высоты отражения волны накачки за счёт эффекта разбухания электрического поля [4].

1.3.3. Генерация искусственных периодических неоднородностей

Механизмы генерации искусственных периодических неоднородностей в поле стоячей волны, которая образуется за счёт суперпозиции падающей и отражённой от ионосферы мощных радиоволн, подробно исследовались в [6]. Было установлено, что на высотах D -области ионосферы искусственные периодические неоднородности формируются за счёт температурной зависимости коэффициента прилипания электронов к молекулам кислорода при тройных соударениях, когда с ростом температуры T_e в пучностях электрического поля стоячей волны коэффициент прилипания растёт, а концентрация электронов падает вместе с ростом концентрации отрицательных ионов. Характерное время развития этого процесса составляет $0,1 \div 1$ с. В E -области искусственные периодические неоднородности формируются за счёт термодиффузионного перераспределения неоднородно нагретой плазмы за характерное время $0,2 \div 2$ с. В F -области и в долине между E - и F -слоями решётка концентрации плазмы формируется за счёт её стрикционного выдавливания из пучностей электрического поля стоячей волны за характерное время $30 \div 300$ мс в F -области и около $0,2 \div 2$ с в межслоевой долине. Относительные вариации концентрации плазмы в искусственных периодических неоднородностях оцениваются величинами порядка $10^{-4} \div 10^{-5}$ в зависимости от высоты образования неоднородностей, мощности и поляризации волны накачки, а также от степени естественной возмущённости ионосферы.

Поскольку при излучении мощной радиоволны с O -поляризацией вблизи уровня её отражения развивается интенсивная искусственная ионосферная турбулентность и значительная часть энергии волны здесь поглощается или рассеивается, искусственные периодические неоднородности имеют заметно большую амплитуду при использовании для их создания волн с X -поляризацией [40]. Отметим, что даже при слабых вариациях концентрации плазмы такая решётка может достаточно сильно влиять на проходящие сквозь неё радиоволны значительно исказить, как показано в [41], амплитуду и фазу отражённого от ионосферы сигнала.

1.4. Влияние подогрева волнами с X -поляризацией на характеристики искусственной турбулентности, возбуждаемой в F_2 -области ионосферы мощными радиоволнами с O -поляризацией

Значительная часть экспериментов по воздействию на ионосферу мощным радиоизлучением с X -поляризацией на стенде «Сура» были выполнены по схеме так называемого дополнительного нагрева ионосферной плазмы [7, 42]. В такой схеме используется модульная конструкция стенда, позволяющая одновременно излучать до трёх мощных радиоволн, причём каждую волну — со своими частотой, мощностью, поляризацией и временным режимом. Как правило, в рассматриваемых ниже экспериментах один модуль стенда излучал волну с O -поляризацией, которая использовалась для генерации искусственных ионосферных неоднородностей и искусственного радиоизлучения ионосферы. По изменению характеристик последних можно судить о влиянии сторонних факторов на развитие искусственной турбулентности. В это время один или два других модуля излучали одну или две волны с X -поляризацией для дополнительного воздействия на ионосферную плазму. Варьируя частоту волны с X -поляризацией, можно изменять уровень её отражения в ионосфере относительно высоты отражения волны с O -поляризацией.

1.4.1. Влияние подогрева волнами с X -поляризацией на характеристики ракурсного рассеяния

Эксперименты по изучению влияния подогрева волнами с X -поляризацией на характеристики декаметровых искусственных ионосферных неоднородностей проводились на стенде «Сура»

в марте 2006 года в условиях вечерней ионосферы [43]. Для генерации мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей один модуль стенда излучал волны с О-поляризацией на частоте $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц и с мощностью $P_{\text{эфф}} = 12$ МВт в режиме 1 мин — излучение, 2 мин — пауза. Для дополнительного подогрева плазмы использовались два других модуля, которые излучали волну с Х-поляризацией на частоте $f = 5010$ кГц с мощностью $P_{\text{эфф}} = 50$ МВт в режиме 2 мин — излучение, 4 мин — пауза. Причём волна с Х-поляризацией начинала излучаться за 1 мин до включения каждого второго импульса волны с О-поляризацией и продолжала излучаться всё время, пока излучалась волна с О-поляризацией. В этих измерениях частоты волн с О- и Х-поляризацией были выбраны таким образом, чтобы волны отражались приблизительно на одной высоте. Сами частоты были достаточно далеки от гармоник гирочастоты, где спектральные характеристики рассеяния сильно зависят от частоты волны накачки [44]. Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности с поперечным размером $l_{\perp} \approx 12 \div 15$ м контролировались методом ракурсного рассеяния радиоволн в приёмном пункте около г. С.-Петербурга.

Выполненные эксперименты продемонстрировали, что при дополнительном подогреве волной с Х-поляризацией уменьшается интенсивность рассеянного сигнала, что прямо свидетельствует о подавлении генерации декаметровых искусственных ионосферных неоднородностей. Кроме того, сужается спектр рассеянного сигнала по сравнению с нагревом ионосферы только волной с О-поляризацией. Последнее может свидетельствовать об уменьшении хаотической скорости движения неоднородностей при включении мощной радиоволны с Х-поляризацией, формирующей спектральное уширение рассеянного сигнала.

1.4.2. Влияние подогрева волной с Х-поляризацией на спектральные и динамические характеристики искусственного радиоизлучения ионосферы

При взаимодействии мощной радиоволны с О-поляризацией с плазмой верхней ионосферы возбуждаются высокочастотные плазменные колебания, которые переизлучаются в электромагнитные волны малой интенсивности на частотах в диапазоне $\pm(50 \div 200)$ кГц относительно частоты волны накачки $f_{\text{ВН}}$. Эти электромагнитные волны и представляют собой искусственное радиоизлучение ионосферы. Его различные компоненты, которых сегодня известно более десятка [45–47], позволяют диагностировать разнообразные процессы, протекающие на различных стадиях взаимодействия мощного КВ радиоизлучения с плазмой.

Спектральные и динамические характеристики различных компонент искусственного радиоизлучения ионосферы сегодня достаточно полно изучены для всего возможного для стенда «Сура» диапазона частот волны накачки (см. [46, 47] и цитируемую там литературу), что важно для диагностики искусственной ионосферной турбулентности. Искусственное радиоизлучение ионосферы как диагностическое средство турбулентности имеет целый ряд преимуществ перед другими средствами, поскольку этот пассивный метод не требует сложных специальных приёмных устройств, позволяет оперативно контролировать проведение экспериментов и получаемые результаты. В частности, с его помощью легко определять частоту гармоник гирочастоты электронов в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой.

Искусственное радиоизлучение ионосферы достаточно гибко реагирует на изменяющиеся условия генерации турбулентности, возбуждается только при излучении мощных радиоволн с О-поляризацией. Однако для генерации искусственного радиоизлучения ионосферы необходима достаточно мощная радиоволна, которая сама способна генерировать искусственную ионосферную турбулентность и, следовательно, может заметно влиять на результаты экспериментов. Это необходимо учитывать при их интерпретации.

В марте 1995 года на стенде «Сура» были выполнены первые эксперименты по изучению вли-

яния подогрева ионосферной плазмы волной с X-поляризацией на характеристики искусственной ионосферной турбулентности, индуцированной мощной волной с O-поляризацией. Они были проделаны в марте 1996 года и сентябре 1997 года. Во всех этих экспериментах, результаты которых опубликованы в [7], применялась схема дополнительного нагрева ионосферной плазмы мощными радиоволнами с X-поляризацией.

Анализ искусственного радиоизлучения ионосферы показал, что дополнительный нагрев плазмы волной с X-поляризацией уменьшает интенсивность возбуждаемой волной с O-поляризацией высокочастотной плазменной турбулентности как стрикционной, так и тепловой природы и, в частности, уменьшает амплитуду мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (особенно метрового поперечного размера), что подтверждает результаты [43]. Поскольку эффекты, связанные с подогревом волной с X-поляризацией, не исчезают, когда частота волны накачки $f_x > f_{oF_2}$ (или когда остаточная волна с O-поляризацией, излучаемая вместе с X-поляризованной волной из-за неидеальности развязки антенны по поляризации, проходит сквозь F_2 -слой ионосферы), следует заключить, что здесь, действительно, происходит дополнительный подогрев волной с X-поляризацией, а не изменение свойств искусственного радиоизлучения ионосферы под действием остаточной волны с O-поляризацией. Это важно, поскольку при мощности излучения волны с X-поляризацией $P_{xэфф} \approx 40$ МВт (излучение двумя секциями антенны в когерентном режиме) и развязке по поляризации около -15 дБ сопутствующее излучение с O-поляризацией может иметь мощность порядка 1 МВт, что в условиях вечерней ионосферы сравнимо или даже превышает порог генерации тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости [2, 3, 42]. Следует подчеркнуть, что дополнительный нагрев плазмы волной с X-поляризацией обнаруживается только при достаточно высокой мощности волны накачки, превышающей 20 МВт; с ростом мощности подогревной волны величина наблюдаемых эффектов увеличивается, но не быстрее, чем пропорционально первой степени мощности волны с X-поляризацией.

В этих экспериментах особое внимание было уделено зависимости наблюдаемых эффектов от соотношения частот волн с O- и X-поляризациями и было показано, что влияние нагрева волной с X-поляризацией проявляется наиболее сильно, когда обе волны отражаются приблизительно на одной высоте. Это исключает возможность объяснить наблюдаемые эффекты только увеличением поглощения мощной радиоволны с O-поляризацией в нижней ионосфере (т. е. в её D- и E-слоях) при её разогреве мощной волной с X-поляризацией. Нагрев волной с X-поляризацией проявляется в полосе частот 1 МГц около оптимальной частоты $f_x^{opt} \approx f_o + 0,5f_{eH}$ (здесь f_o — частота волны с O-поляризацией, $f_{eH} \approx 1,35$ МГц — гирочастота электронов в проводимых на стенде «Сура» измерениях). Поэтому можно сделать вывод, что создаваемые волной с X-поляризацией возмущения плазмы занимают высотный интервал $10 \div 20$ км, который соответствует длине теплопроводности вдоль силовых линий геомагнитного поля на высоте 250 км [11].

Выполненные с помощью искусственного радиоизлучения ионосферы исследования со всей очевидностью продемонстрировали, что дополнительный нагрев плазмы волнами с X-поляризацией проявляется в широком интервале характерных времён от долей секунды до минуты и больше, отражая параллельное развитие нескольких процессов. Ясно, что индуцируемые мощной волной с X-поляризацией эффекты в той или иной мере должны иметь место и при нагреве ионосферной плазмы мощной волной с O-поляризацией. Однако в этом случае они маскируются интенсивной искусственной ионосферной турбулентностью. В этом заключается принципиальное значение проводимых исследований с дополнительным подогревом волной с X-поляризацией, поскольку они могут дать новые сведения об особенностях эволюции и свойствах турбулентности, индуцируемой мощной волной с O-поляризацией.

1.4.3. Влияние подогрева волной с X-поляризацией на искусственное оптическое свечение верхней атмосферы

В феврале 2008 года в экспериментах на стенде HAARP было изучено как дополнительный подогрев ионосферы мощными волнами с X-поляризацией влияет на генерацию искусственного оптического излучения из возмущённой области ионосферы [48]. Эксперимент был организован следующим образом. В течение 90 с излучались две мощные радиоволны с O- и X-поляризациями; затем в течение 90 с излучалась только волна с O-поляризацией, после чего была пауза длительностью 120 с. Волна с O-поляризацией излучалась на частоте 2,7 МГц с мощностью $P_{эфф} \approx 102$ МВт; волна с X-поляризацией излучалась на частоте 3,4 МГц с мощностью $P_{эфф} \approx 155$ МВт. Частоты мощных радиоволн были выбраны таким образом, чтобы они отражались приблизительно на одной и той же высоте в F_2 -области ионосферы. Оптическое излучение регистрировалось в красной линии кислорода ($\lambda = 630$ нм).

Измерения показали, что при совместном излучении волн с O- и X-поляризациями замедляется рост интенсивности оптического излучения и уменьшается максимальная интенсивность по области свечения, а сама область свечения сужается. Также было установлено, что генерация оптического излучения при подогреве волной с X-поляризацией подавляется сильнее после длительной паузы и уменьшается от цикла к циклу используемой программы излучения мощных радиоволн.

Полученные результаты авторы [48] интерпретировали с точки зрения дополнительного увеличения температуры электронов при добавочном нагреве волной с X-поляризацией. Это, по их мнению, должно увеличивать порог развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости и, в конечном итоге, уменьшать эффективность ускорения электронов, которые стимулируют генерацию оптического излучения в красной линии кислорода. Увеличение пороговой мощности нагрева должно также приводить к подавлению генерации тепловых компонент искусственного радиоизлучения ионосферы и мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, что и наблюдалось в экспериментах [7, 43].

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как нетрудно видеть из представленных в разделе 1 результатов различных экспериментов, модификация ионосферы мощным КВ радиоизлучением с X-поляризацией с мощностью $P_{эфф} \approx 100$ МВт характеризуется развитием различного рода эффектов на временах от десятков микросекунд до десятков минут. Некоторые из этих эффектов получили интерпретацию, адекватную имеющимся экспериментальным данным. В первую очередь это касается омического нагрева ионосферной плазмы мощным КВ радиоизлучением в пределах диаграммы направленности антенны [3, 4, 8, 11, 17, 18], в результате чего формируются искусственные периодические неоднородности в D - и E -слоях [6] (характерные времена $0,1 \div 2$ с), область с увеличенной на $10 \div 20$ % концентрацией плазмы (дефокусирующая линза) на высотах $130 \div 150$ км [20] (характерные времена порядка 30 с) и область с дефицитом концентрации плазмы до нескольких процентов (фокусирующая линза) на высотах F_2 -области [8] (характерные времена $3 \div 10$ мин). Рост температуры электронов в возмущённой области ионосферы может повлиять на развитие плазменных неустойчивостей и, следовательно, на генерацию и свойства различных компонент искусственной ионосферной турбулентности. Влияние нагрева ионосферы мощным радиоизлучением на взаимодействие мощных радиоволн с плазмой было достаточно подробно описано в первом разделе работы при рассмотрении полученных экспериментальных результатов.

В результате развития самофокусирующей неустойчивости [5, 31] нагрев ионосферы мощ-

ными радиоволнами с X-поляризацией приводит также к генерации среднемасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с поперечным размером $l_{\perp} \approx 0,1 \div 1$ км (характерные времена порядка $0,5 \div 2$ мин), которые вызывают появление F_{spread} на ионограммах, рассеяние радиоволн КВ диапазона и изменяют структуру электромагнитных полей внутри возмущённой области ионосферы. Свойства плазменной турбулентности, развивающейся в возмущённой области ионосферы под воздействием всех этих факторов, определяют возможные пути и степень влияния нагрева волнами с X-поляризацией на изменение начального состояния ионосферы, а через это и на свойства развивающейся искусственной ионосферной турбулентности, а также на свойства разного рода эффектов последствия этого нагрева [7, 48].

При этом, как было отмечено в разделе 1, при некоторых условиях совместное излучение мощных волн с O- и X-поляризациями может усилить влияние волны с X-поляризацией, т. к. волна с O-поляризацией создаёт интенсивную турбулентность вблизи уровня своего отражения в F_2 -области ионосферы и может стимулировать через неё взаимодействие X-волны с плазмой. Однако чаще развитие сильной искусственной ионосферной турбулентности при модификации плазмы волной с O-поляризацией маскирует проявление турбулентности, возбуждаемой волной с X-поляризацией.

Помимо омического нагрева плазмы мощными волнами с X-поляризацией и их самофокусировки в последнее время стали рассматриваться и другие механизмы взаимодействия радиоволн с ионосферной плазмой. Приведём их краткое рассмотрение.

В статье [49] проанализирован процесс индуцированного рассеяния на ионах мощной радиоволны с X-поляризацией с возбуждением электронно-циклотронных или верхнегибридных колебаний ионосферной плазмы. Показано, что для частот волны накачки, находящихся между гармониками гирочастоты электронов, пороговое электрическое поле развития неустойчивости минимально вблизи уровня отражения мощной радиоволны. В F_2 -слое ионосферы оно порядка 1 В/м. Такое поле может достигаться в нагревных экспериментах (с учётом эффекта «разбухания» электрического поля мощной радиоволны вблизи точки её отражения) уже при мощности волны накачки $P_{\text{эфф}} \approx 20 \div 50$ МВт. Пороговое поле сильно возрастает при приближении частоты волны накачки к частоте гармоники гирочастоты электронов сверху; неустойчивость не возбуждается, если частота волны накачки немного меньше частоты гирогармоники. Такого рода неустойчивость возможна и для волн с O-поляризацией, но из-за высокой пороговой мощности она маскируется другими неустойчивостями при резонансном взаимодействии мощной волны с O-поляризацией с плазмой.

Из сказанного ясно, что указанная неустойчивость для мощных волн с X-поляризацией будет развиваться в верхней ионосфере в области их отражения и только при достаточно больших значениях эффективной мощности излучения волны накачки. Влияние наличия точки отражения мощных волн с X-поляризацией и необходимые высокие мощности для получения наблюдаемых эффектов воздействия находятся в согласии с рядом обсуждаемых выше экспериментальных данных.

В области интенсивной генерации плазменных колебаний должны регистрироваться более интенсивный нагрев плазмы и изменение концентрации электронов. Здесь для выяснения роли рассмотренного механизма необходимо экспериментально изучить изменение свойств наблюдаемой модификации плазмы в условиях, когда частота мощной волны с X-поляризацией близка к частоте гармоники гирочастоты электронов вблизи уровня её отражения в F_2 -области ионосферы. Ясно, такие исследования надо проводить в условиях, когда частота волны накачки $f_x > f_{oF_2}$, чтобы избежать влияния остаточной волны с O-поляризацией на развитие искусственной турбулентности при излучении мощной радиоволны с X-поляризацией.

В последние годы активно обсуждается проблема, как модификация плазмы в пределах диа-

граммы направленности излучения пучка мощных радиоволн может влиять на происходящие в возмущённой области ионосферы процессы.

Рассматривая приведённые в [19] результаты экспериментов, мы отмечали, что нагрев ионосферы излучением с переменной во времени интенсивностью приводит к генерации магнитных пульсаций, причём они более интенсивны в случае нагрева мощной радиоволной с X-поляризацией. Использование волн с O- или X-поляризацией отражается также на соотношении магнитных компонент генерируемых пульсаций.

В основе этого явления лежит неустойчивость, в результате которой одновременно генерируются флуктуации геомагнитного поля и крупномасштабные неоднородности концентрации плазмы под воздействием силы теплового давления \mathbf{F}_T разогретых полем мощной радиоволны электронов плазмы (известная как filamentation instability [50]). Сила теплового давления выталкивает электроны с оси пучка волн, где их температура выше. При этом электроны начинают дрейфовать в скрещенных полях \mathbf{F}_T и \mathbf{B}_0 , что создаёт кольцевой диамагнитный ток, текущий по поверхности пучка в перпендикулярной к внешнему магнитному полю плоскости. То же имеет место и при генерации крупномасштабных неоднородностей плазмы, электроны в которых разогреты полем мощной радиоволны.

Этот механизм был положен в основу нового метода генерации магнитогидродинамических волн в ультранизкочастотном диапазоне при периодическом изменении мощности волны накачки, приводившем к изменению силы кольцевого тока. Действенность такого метода недавно была продемонстрирована в экспериментах на стенде HAARP [51]. Теория такого механизма генерации как магнитоакустических, так и альфвеновских волн изложена в [28].

Эксперименты [29] на лабораторной плазменной установке продемонстрировали, что пространственная неоднородность амплитуды высокочастотного (ВЧ) электрического поля пучка конечной ширины приводит к возникновению поперечной к оси пучка пондеромоторной силы, которая при наличии ещё и поперечного к пондеромоторной силе внешнего магнитного поля вызывает азимутальный дрейф электронов, т. е. возбуждает соленоидальные нелинейные токи. Поскольку электроны втягиваются в область сильного электрического поля, то возбуждаемый под действием пондеромоторной силы азимутальный ток вызывает парамагнитный эффект — усиливает внешнее магнитное поле в пучке мощных радиоволн.

В работе [52] было показано, что вариации температуры в неоднородной плазме приводят к генерации магнитных полей, пропорциональных $[\nabla N, \nabla T]$, что позволяет рассматривать периодически нагреваемую область ионосферы как антенну, излучающую волны в очень- и ультранизкочастотном диапазоне.

Экспериментальные данные и теоретические расчёты [28, 29, 50–52] показывают, что модификация плазмы пучком мощных радиоволн за счёт силы теплового давления или пондеромоторной силы способна приводить к генерации соленоидальных токов. Последние могут возмущать состояние плазмы вследствие развития различного рода токовых неустойчивостей, вызывать генерацию искусственной ионосферной турбулентности и изменять её характеристики. Этот механизм генерации турбулентности и его влияние на взаимодействие мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой ещё нуждается в своей детальной теоретической проработке. Однако уже сейчас можно достаточно уверенно допускать, что этот механизм может обуславливать большие (10–30 мин) времена релаксации декаметровых неоднородностей при нагреве F_2 -области ионосферы волной с X-поляризацией, регистрировавшиеся в экспериментах [38, 39], а также часто наблюдаемые большие времена последствия предыдущих циклов нагрева. Возможно, с этим также связано влияние модификации F_2 -области на характер развития турбулентности в нижней ионосфере [53].

3. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Выполненный на стенде «Сура» цикл исследований доказывает, что периодическое воздействие на ионосферную плазму мощным КВ радиоизлучением вызывает генерацию или усиление перемещающихся ионосферных возмущений, которые по своим характеристикам отвечают внутренним гравитационным волнам [54–56]. Следует заметить, что любой эксперимент по модификации ионосферы мощными радиоволнами проводится по схеме повторяющегося многократного их воздействия на плазму с периодом от долей секунды до десятков минут в зависимости от решаемой задачи и в определённых условиях приводит к генерации перемещающихся ионосферных возмущений. Как было установлено в [57], такие возмущения влияют на интенсивность возбуждаемых искусственных ионосферных неоднородностей. Как перемещающиеся ионосферные возмущения влияют на генерацию и эволюцию других компонент искусственной ионосферной турбулентности ещё предстоит выяснить. С генерацией внутренних гравитационных волн в возмущённой области ионосферы в настоящее время связывается возможность объяснить уменьшение интенсивности микроволнового излучения в линии озона на частоте порядка 110 ГГц на высотах мезосферы (т. е. в D -области) при нагреве ионосферы мощными радиоволнами с X -поляризацией [16, 58].

Полученные экспериментальные данные при нагреве ионосферы мощными радиоволнами с X -поляризацией показывают, что в ряде случаев проявляется модификация параметров плазмы в пределах диаграммы направленности излучения мощной радиоволны. В частности, это влияет на времена релаксации дециметровых искусственных ионосферных неоднородностей [38, 39]. Естественно возникает вопрос, как подобные эффекты могут проявляться при нагреве ионосферы мощными радиоволнами с O -поляризацией? Здесь мы можем сослаться на результаты измерения времени релаксации мелкомасштабных неоднородностей с поперечным размером $l_{\perp} \approx 8$ м в зависимости от их положения в возмущённой области, опубликованные в [59] и 30 лет остававшиеся необъяснёнными. Эти измерения показали, что мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности релаксируют в 3–4 раза медленнее на краях возмущённой области, чем в её центральной части ($15 \div 20$ с по сравнению с 5 с). Не исключено, что этот эффект имеет отношение к поддержанию неоднородностей плазмы за счёт возбуждения соленоидальных токов по периметру возмущённой области, заполненной крупномасштабными неоднородностями [28]. Возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей вне главного лепестка диаграммы направленности излучения мощной радиоволны с O -поляризацией наблюдалось в [60]. Оно не укладывается в рамки принятых представлений о пространственной структуре области генерации искусственных ионосферных неоднородностей и также может быть связано с генерацией соленоидальных токов.

Наконец, во многих экспериментах обнаружены эффекты последействия на временах до $10 \div 20$ мин после выключения волны накачки, которые должны быть связаны с релаксацией плазменных возмущений в пределах диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн. По-видимому, этот же процесс релаксации определяет обнаруженную в [1] зависимость времени релаксации поглощения радиоволн в нижней ионосфере от длительности модификации ионосферы. Однако следует ещё раз подчеркнуть, что мощное КВ радиоизлучение с O -поляризацией приводит к генерации интенсивной искусственной ионосферной турбулентности во всей возмущённой F_2 -области ионосферы, качественно изменяет условия взаимодействия мощных радиоволн с плазмой и зачастую маскирует развитие других эффектов. Так, согласно [7] развитие сильного слоя F_{spread} , т. е. интенсивных искусственных ионосферных неоднородностей с поперечным размером $l_{\perp} \geq 0,1$ км, подавляет влияние подогрева волнами с X -поляризацией на искусственное радиоизлучение ионосферы.

Рассмотренные в работе экспериментальные данные относятся к особенностям нагрева различных областей ионосферы волнами с X-поляризацией и его влияния на свойства искусственной ионосферной турбулентности. Помимо них следует отметить эффекты, связанные с генерацией сигналов на комбинационных частотах вследствие эффекта Гетманцева при воздействии на ионосферу мощными промодулированными по амплитуде радиоволнами [61]. Выполненные в авроральной ионосфере на нагревном стенде EISCAT исследования показывают, что в отдельных случаях воздействие на E-слой ионосферы модулированным по амплитуде излучением с X-поляризацией может стимулировать высыпание энергичных частиц из радиационных поясов Земли [62]. Это, в свою очередь, должно изменять ионосферную обстановку и условия генерации искусственной ионосферной турбулентности.

В завершение перечислим возможные эксперименты, которые желательно провести в будущем для более полного прояснения природы явлений, наблюдаемых при нагреве ионосферной плазмы волнами с X-поляризацией. В первую очередь, необходимо выяснить влияние ширины пучка мощных радиоволн, т. е. радиального распределения интенсивности электромагнитного излучения в волне накачки, на характеристики явлений, связанных с модификацией плазмы в пределах диаграммы направленности излучения мощной радиоволны. Во-вторых, следует более детально исследовать зависимость эффектов от соотношения частоты волны накачки с X-поляризацией и гармоник гирочастоты электронов. В-третьих, необходимо дополнительно исследовать свойства наблюдаемых эффектов в зависимости от времени суток, близости частоты волны накачки к критической частоте F_2 -слоя ионосферы, интенсивности регулярного и спорадического E-слоёв. В-четвёртых, надо выполнить эксперименты по возбуждению мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при модификации среднеширотного F_2 -слоя ионосферы и изучить их характеристики, т. к. до сих пор генерация таких неоднородностей обнаруживалась только при нагреве высокоширотной ионосферы. Необходимо сравнить их свойства со свойствами неоднородностей плазмы, возбуждаемых в высокоширотной ионосфере. В-пятых, проводимые эксперименты следует сопровождать измерением вариаций магнитного поля с целью выяснить роль возбуждаемых при нагреве ионосферы волнами с X-поляризацией электрических токов в возмущённой области ионосферы.

Более полное изучение природы явлений, наблюдаемых при нагреве ионосферы волнами с X-поляризацией, несомненно, позволит глубже понять свойства искусственной ионосферной турбулентности, возбуждаемой мощными радиоволнами не только с X-, но и с O-поляризацией.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-02-00374-а), ФЦП «Геофизика» и Министерства образования и науки РФ (гос. контракт 16.518.11.7066).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Utlaut W. F., Violette E. J. // Radio Sci. 1974. V. 9. P. 895.
2. 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. 1261.
6. 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. Hansen J. D., Morales G. J., Duncan L. M., et al. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 65. P. 3285.

9. Duncan L. M., Sheerin J. P., Behnke R. A. // *Phys. Rev. Lett.* 1988. V. 61. P. 239.
10. Duncan L. M., Behnke R. A. // *Phys. Rev. Lett.* 1978. V. 41. P. 998.
11. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере.* М.: Наука, 1973.
12. Гуревич А. В., Шлюгер И. С. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1975. Т. 18, № 9. С. 1237.
13. Holway L. H., Meltz G. // *J. Geophys. Res. A.* 1973. V. 78. P. 8402.
14. Rietveld M. T., Kohl H., Kopka H., Stubbe P. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1993. V. 55. P. 577.
15. Belova E., Chilson P. B., Kirkwood S., Rietveld M. T. // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, No. 8. P. 8446.
16. Куликов Ю. Ю., Фролов В. Л., Григорьев Г. И. и др. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2012. (в печати).
17. Löfås H., Ivchenko N., Gustavsson B., et al. // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 2585.
18. Gustavsson B., Rietveld M., Ivchenko N. // *RF Ionospheric Interactions Workshop, Boulder, Colorado, 19-22 April 2009: Abstracts on CD.*
19. Kuo S., Cheng W.-T., Snyder A., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. Art. no. L01101.
20. Бойко Г. Н., Васьков В. В., Голян С. Ф. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1985. Т. 28, № 8. С. 960.
21. Belikovich V. V., Benediktov E. A., Terina G. I. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1986. V. 48. P. 1247.
22. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 2003. V. 108, No. 4. P. 1141.
23. Васьков В. В., Гуревич А. В., Димант Я. С. // *ЖЭТФ.* 1983. Т. 84. С. 536.
24. Васьков В. В., Милих Г. М. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1983. Т. 23. С. 196.
25. Gurevich A. V., Dimant Ya. S., Milikh G. M., Vas'kov V. V. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1985. V. 47. P. 1057.
26. Mishin E. V., Kosch M. J., Pedersen T. R., Burke W. J. // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. Art. no. L23106.
27. Gustavsson B., Eliasson B. // *J. Geophys. Res.* V. 113. Art. no. A08319.
28. Vochkarev K. V., Zybin K. P. // *Phys. Lett. A.* 2010. V. 374. P. 1508.
29. Гуцин М. Е., Коробков С. В., Костров А. В., Стриковский А. В. // *Письма в ЖЭТФ.* 2008. Т. 88, вып. 11. С. 834.
30. Allen E. M., Thome G. D., Rao P. V. // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 9, No. 11. P. 905.
31. Guzdar P. N., Chaturvedi P. K., Papadopoulos K., Ossakow S. L. // *J. Geophys. Res. A.* 1998. V. 103, No. 2. P. 2231.
32. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Мясников Е. Н. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
33. Zabotin N. A., Bronin A. G., Zhbankov G. A., et al. // *Radio Sci.* 2002. V. 37, No. 6. P. 1102.
34. Ерухимов Л. М., Комраков Г. П., Фролов В. Л. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1980. Т. 20, № 6. С. 1112.
35. Zabotin N. A., Bronin A. G., Zhbankov G. A. // *Waves in Random Media.* 1998. V. 8. P. 421.
36. Hedberg Å., Derblom H., Thidé B., et al. // *Radio sci.*, 1983. V. 18, No. 6. P. 840.
37. Robinson T. R., Stocker A. J., Bond G. E., et al. // *Ann. Geophys.* 1997. V. 15. P. 134.
38. Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Йоман Т. К., Ритвелд М. Т. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2010. Т. 53, № 9–10. С. 571.
39. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Yeoman T. K., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. Art. no. L08802.
40. Бахметьева Н. В., Беликович В. В. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2007. Т. 50, № 8. С. 695.
41. Huang Z. H., Fejer J. A. // *Radio Sci.* 1987. V. 22, № 4. P. 663.
42. Фролов В. Л. Искусственная плазменная турбулентность верхней ионосферы, возбуждаемая

- мощным КВ-радиоизлучением наземных передатчиков. Результаты экспериментальных исследований: Дисс. ... доктора физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 1996. 419 с.
43. Фролов В. Л., Рыжов Н. А., Вертоградов Г. Г. и др. // Труды XXII Всерос. конф. по распространению радиоволн. Ростов-на-Дону, 2008. Т. 2. С. 218.
 44. Каган Л. М., Николлс М. Дж., Келли М. С. и др. // Радиофизика и радиоастрономия. 2006. Т. 11, № 3. С. 221.
 45. Stubbe P., Kopka H., Thide B., Derblom H. // J. Geophys. Res. A. 1984. V. 89. P. 7523.
 46. Frolov V. L., Sergeev E. N., Ermakova E. N., et al. // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28, No. 16. P. 3103.
 47. Sergeev E. N., Frolov V. L., Grach S. M., Kotov P. V. // Adv. Space Res. 2006. V. 38. P. 2518.
 48. Gustavsson B., Newsome R., Leyser T. B., et al. // Geophys. Res. Lett. V. 36. Art. no. L20102.
 49. Васьков В. В., Рябова Н. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40, № 5. С. 541.
 50. Lee M. C., Kuo S. P. // Radio Sci. 1985. V. 20, No. 3. P. 539.
 51. Papadopoulos K., Tesfaye B., Shroff H., et al. // American Geophys. Union. Fall Meeting. 2007.
 52. Papadopoulos K., Chang C. L. // Geophys. Res. Lett. 1985. V. 12, No. 5. P. 279.
 53. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Вяхирев В. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 5–6. С. 338.
 54. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 859.
 55. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Пушкин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 81.
 56. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2 С. 14.
 57. Senior A., Kosh M. J., Yeoman T. K., et al. // Ann. Geophys. 2006. V. 24. P. 2347.
 58. Куликов Ю. Ю., Григорьев Г. И., Красильников А. А., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2, С. 57.
 59. Ерухимов Л. М., Коровин А. В., Митяков Н. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25, № 11. С. 1360.
 60. Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Понятов А. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 12. С. 1011.
 61. Беляев П. П., Котик Д. С., Митяков С. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 248.
 62. Благовещенская Н. Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. С.-Петербург: Гидрометеоиздат, 2001.

Поступила в редакцию 26 декабря 2011 г.; принята в печать 27 февраля 2012 г.

ON THE PECULIARITIES OF MODIFICATION OF THE EARTH'S IONOSPHERE BY POWERFUL RADIO WAVES WITH X POLARIZATION AND THE OBSERVED EFFECTS

V. L. Frolov

Available experimental results on modification of the Earth's ionosphere by powerful radio waves with X polarization are reviewed. It is shown that the influence of such heating on the generation of artificial ionospheric turbulence has complex nature and is differently manifested in various ionospheric regions and under different experimental conditions. The mechanisms of generation of the plasma disturbances under ionospheric heating by X-polarization powerful radio waves, which have been proposed by now, are discussed.