

УДК: 533.95 + 550.348

DOI: 10.26907/rwp29.2025.628-631

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ МОЩНЫМ КВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ РАЗЛИЧНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В.Л. Фролов^{1,2}, А.Д. Акчурин², А.В. Першин¹

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, Россия
E-mail: frolov@nirfi.unn.ru

² Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18
E-mail: adel.akchurin@kpfu.ru

Аннотация. Приведены результаты исследований генерации искусственных ионосферных неоднородностей различных масштабов от метров до десятков километров в поперечном к геомагнитному полю направлении при модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением *O* и *X* поляризаций. Эксперименты выполнялись на среднеширотном нагревном стенде СУРА при излучении мощных радиоволн в «магнитный зенит». Показано, что отсутствие генерации декаметровых неоднородностей при нагреве плазмы *F*₂-области ионосферы волнами *X*-поляризации, которая наблюдается на стенде EISCAT-Heating, связано с низким уровнем излучения мощной радиоволны.

Ключевые слова: нагревный стенд СУРА; искусственные ионосферные неоднородности; КВ модификация плазмы ионосферы *O*- и *X*-волнами; *F*-область ионосферы

FEATURES OF ARTIFICIAL IONOSPHERIC PLASMA DENSITY IRREGULARITIES GENERATED BY MODIFYING THE EARTH'S UPPER IONOSPHERE WITH POWERFUL HF RADIO WAVES OF VARIOUS POLARIZATION

V.L. Frolov, A.D. Akchurin, A.V. Pershin

Abstract. The article presents the results of studies of the generation of artificial ionospheric irregularities of various scales from meters to tens of kilometers in the direction transverse to the geomagnetic field lines during the modification of the ionosphere by powerful HF radio waves of *O* and *X* polarizations. The experiments were carried out at the SURA mid-latitude heating facility when powerful radio waves were radiated into the "magnetic zenith". It is shown that the absence of generation of decameter irregularities during heating of the ionospheric *F*₂-region plasma by *X* waves at the SURA facility, whereas such a generation was observed at the EISCAT-Heating facility, is associated with a low level of radiation of a powerful radio wave.

Keywords: SURA heating facility; artificial ionospheric irregularities; HF modification of ionospheric plasma by *O* and *X* waves; ionospheric *F*-region

Введение

Генерация искусственных неоднородностей концентрации плазмы (ИН) является одним из определяющих факторов, характеризующих взаимодействие мощного КВ радиоизлучения с магнитоактивной плазмой (с верхней ионосферой Земли). Интерес к этой проблеме диктуется возможностью использования этих неоднородностей во многих приложениях, включая изучение свойств распространения радиоволн различных диапазонов в турбулентной плазме. Поскольку волна необыкновенной (*X*) поляризации отражается ниже уровня плазменных резонансов (ленгмюровского и верхне-гибридного) [1, 2], считалось, что она может взаимодействовать с ионосферой плазмой только через ее омический нагрев и развитие в ней тепловой самофокусировочной неустойчивости (СФН) мощного радиоизлучения [1]. Однако, как показали выполненные в последние 15 лет нагревные эксперименты на высокоширотном стенде EISCAT/Heating (Тромсё, Сев. Норвегия) [3], это оказалось далеко не так. Встала задача определения детальных характеристик и условий возбуждения различных компонент ИН при модификации среднеширотной ионосферы волнами обеих поляризаций. Эти исследования были выполнены в последние годы на стенде СУРА, используя для нагрева ионосферы мощные радиоволны обеих (*O* и *X*) поляризаций, когда они излучались в «магнитный зенит» для

усиления их взаимодействия с плазмой. Анализ полученных здесь результатов составляет содержание настоящей работы.

Результаты экспериментальных исследований

В этом разделе приводятся сравнительные характеристики генерации ИН различных масштабов l_{\perp} от метра до десятков километров при их возбуждении мощными радиоволнами обеих поляризации.

1) *Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН) с размерами $l_{\perp} = 1\text{--}50$ м.* ИН таких размеров генерируются в F_2 -области вблизи высоты отражения мощной радиоволны O -поляризации при развитии тепловой параметрической неустойчивости. Они ответственны за аномальное ослабление (поглощение) как самой волны накачки (ВН), так и пробных волн O -поляризации, зондирующих возмущенную область ионосферы на частотах, близких к частоте ВН [1,2,4].

Попытки обнаружить генерацию МИИН при X -нагреве ионосферы мощными радиоволнами предпринимались в экспериментах на стенде СУРА неоднократно, используя различные методы их диагностики [4]. Однако все они не дали надежного положительного результата. Как теперь это ясно, это связано с недостаточно высокой эффективной мощностью излучения ВН $P_{\text{эфф}} \leq 100$ МВт для $f_{\text{ВН}} \leq 5.8$ МГц], а также с использованием в прошлых наших измерениях вертикальной диаграммы направленности для излучения мощной радиоволны X -поляризации.

2) *Среднемасштабные искусственные ионосферные неоднородности концентрации плазмы (СИИН) с размерами $l_{\perp} = 0.1\text{--}1$ км.* Появление этих неоднородностей определяется развитием тепловой СФН мощной радиоволны [1]. За счет рассеяния радиоволн СИИН оказывают сильное влияние на распространение радиоволн КВ диапазона, приводя к уменьшению их средней интенсивности и появлению сильных флуктуаций их амплитуды. Отсутствие резонансных эффектов взаимодействия волн X -поляризации с плазмой ослабляет эффективность развития тепловой СФН и генерации СИИН, интенсивность которых может уменьшиться на 6–10 дБ по сравнению с O -нагревом ионосферы. Особенно сильно это проявляется в дневных условиях при высоком уровне поглощения КВ излучений в нижней ионосфере. Поэтому генерация этих неоднородностей в дневных условиях, когда регистрируется сильное поглощение радиоволн в нижней ионосфере и их дефокусировка на высотах 130–180 км, если и наблюдается, то только до слабого уровня и только для мощных радиоволн O -поляризации. [4].

3) *Крупномасштабные искусственные ионосферные неоднородности (КИИН) с размерами $l_{\perp} \approx 1\text{--}10$ км.* Считается, что генерация неоднородностей таких масштабов происходит за счет разогрева естественных неоднородностей плазмы электромагнитным полем мощной радиоволны с учетом развития в ней тепловой СФН [1]. Отмечается, что в среднеширотной ионосфере генерация КИИН резко увеличивается после захода Солнца на ионосферных высотах и перехода к ночным условиям образования ионосферы. Эффективность нагрева плазмы и генерация КИИН вблизи высоты отражения мощной радиоволны X поляризации меньше по сравнению с волной O поляризации на 3–6 дБ за счет резонансного взаимодействия последней с плазмой.

Развитие СИИН и КИИН отвечает за появление эффекта F -рассеяния в среднеширотной ионосфере, в основе которого лежит рассеяние зондирующих ионосферу радиоволн на вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностях концентрации плазмы с размерами $l_{\perp} \approx 0.5\text{--}5$ км. На ионограммах вертикального зондирования при этом появляется искусственная диффузность или F_{spread} . При X -нагреве ионосферы наиболее интенсивная генерация КИИН наблюдается, если X -волна распространяется в F_2 -области почти вдоль геомагнитного поля (излучение направлено в «магнитный зенит») с отклонением от него не больше, чем на несколько градусов [3].

4) *Генерация сверх крупномасштабных неоднородностей концентрации плазмы с размерами $l_{\perp} \approx 30\text{--}100$ км.* К таким структурам мы будем относить: 1) полость с уменьшенной концентрацией плазмы (фокусирующая линза), формирующаяся вблизи высоты отражения мощной радиоволны за счет нагрева плазмы и ее вытеснения вверх и вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля, и 2) область с увеличенной концентрацией плазмы на высотах 130–180 км

(дефокусирующая линза), которая формируется за счет нарушения на этих высотах ионизационно-рекомбинационного баланса при увеличении температуры электронов плазмы. При X -нагреве ионосферы ослабление N_e в фокусирующей линзе в несколько раз было меньше, чем при O -нагреве. Было установлено, что дефокусирующая линза образуется при модификации дневной ионосферы мощными радиоволнами обеих поляризаций и более эффективно для волн X поляризации. При этом ослабление интенсивности мощной радиоволны за счёт ее дефокусировки может достигать до 20 дБ и более на уровне её отражения в F_2 -слое ионосферы.

Совместное влияние более высокого уровня поглощения радиоволн в нижней ионосфере (в ее D и E слоях), особенно сильное в полуденные часы, и дефокусировки радиоволн приводит к тому, что в условиях дневной ионосферы интенсивность потока излучения мощной радиоволны на уровне F_2 -области может быть ослаблена более чем на 20 дБ по сравнению со случаем распространения ВН в свободном пространстве. Это приводит к уменьшению потока ее мощности на высоты F_2 -области и к ослаблению здесь эффективности ее взаимодействия с плазмой. Именно поэтому генерируемая в F_2 -области ионосферы искусственная ионосферная турбулентность во всех экспериментах имеет гораздо более слабую интенсивность при модификации дневной ионосферы по сравнению с нагревом плазмы в вечерние и ночные часы.

Заключение

Подводя итоги исследованиям, выполненным на среднеширотном стенде СУРА, эффективная мощность излучения которого для частот $f_{ВН} \approx 4.3\text{--}5.8$ МГц составляет $P_{эф} \approx 80\text{--}150$ МВт без учета поглощения радиоволн в нижней ионосфере и влияния разного рода других геофизических эффектов, можно констатировать, что, за исключением МИИН, генерация СИИН, КИИН и сверх крупномасштабных ИН наблюдается и при нагреве ионосферы мощными радиоволнами X -поляризации, хотя и с меньшей (в среднем на ~ 6 дБ) интенсивностью, чем для волн O -поляризации. При этом наиболее оптимальными условиями для генерации ИН, особенно мощными радиоволнами X -поляризации, являются поздние вечерние и ночные часы, когда ионосфера уже не освещается Солнцем и практически исчезает поглощение мощной радиоволны в ее нижних слоях, а также в условиях, когда имеет место повышенный уровень геомагнитной активности.

Согласно модели, представленной в [5], генерация МИИН при X -нагреве ионосферной плазмы происходит в два этапа. На первом этапе происходит развитие тепловой СФН мощной радиоволны X -поляризации и появление СИИН и КИИН с размерами $l_{\perp} \approx 1\text{--}10$ км, благодаря которым в ионосфере появляются большие градиенты концентрации плазмы. Важно, что эффективное развитие этих неоднородностей наблюдается, когда мощная радиоволна X поляризации распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля. Параллельно при общем нагреве ионосферной плазмы вблизи высоты отражения ВН образуется фокусирующая линза, внутри которой средняя плотность плазмы уменьшается, а ее температура увеличивается по сравнению с окружающим эту полость их значениями. При этом появляющиеся градиенты концентрации ∇N_e и температуры ∇T_e имеют разные знаки. На втором этапе генерации неустойчивости индуцированные нагревом плазмы градиенты ее концентрации и температуры стимулируют развитие температурной градиентно-дрейфовой неустойчивости, которая приводит к генерации декаметровых ИН. Такое развитие декаметровых неоднородностей наблюдается, если эффективная мощность излучения X -волны достигает величины не меньше 150–200 МВт. Предложенная модель, в целом, объясняет все основные особенности генерации декаметровых ИН при модификации F_2 -области ионосферы мощными радиоволнами X поляризации.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников стенда СУРА за помощь в организации и проведении экспериментов.

Рассматриваемые в работе исследования особенностей генерации ИИН были выполнены Фроловым В.Л. при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 25-22-00018.

Список литературы

1. Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. – New York: Springer, 1978. – 372 p.
2. Streltsov A. V., Berthelier J.-J., Chernyshov A. A., et al. Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space // Space Science Review. – 2018. – Vol. 214. – No. 118. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>.
3. Blagoveshchenskaya N.F. Perturbing the High-Latitude Upper Ionosphere (F Region) with Powerful HF Radio Waves: A 25-Year Collaboration with EISCAT // URSI Radio Science Bulletin. – 2020. – No. 373. – P. 40–55. <https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2020.9318436>
4. Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. – Нижний Новгород: изд. ННГУ, 2017. – 468 с.
5. Borisov N., Honary F., Li H. Excitation of plasma irregularities in the F region of the ionosphere by powerful HF radio waves of X-polarization.// J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2018. – Vol. 123. – P. 5246–5260. <https://doi.org/10.1029/2018JA025530>.