Лекция. БШФФ-2026. С. 4—7.

УДК 533.951
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-4

ЯВЛЕНИЯ В ВЕРХНЕЙ (F-ОБЛАСТЬ) ИОНОСФЕРЕ ПРИ ВЫСОКИХ ЭФФЕКТИВНЫХ МОЩНОСТЯХ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛН НАКАЧКИ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Н.Ф. Благовещенская

Государственный научный центр Российской Федерации
«Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия, nataly@aari.ru

PHENOMENA IN THE UPPER (F REGION) IONOSPHERE INDUCED BY HF PUMP WAVES AT HIGH EFFECTIVE RADIATED POWER

N.F. Blagoveshchenskaya

State Scientific Center of the Russian Federation “Arctic and Antarctic Research Institute”, St. Petersburg, Russia

Аннотация. В лекции представлены результаты исследования явлений, происходящих в верхней ионосфере (F-область) под воздействием мощных КВ-радиоволн обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризаций при высокой эффективной мощности излучения ($P_{эфф}$ > 250 МВт). Основное внимание уделяется нелинейным нерезонансным явлениям в условиях, когда частота волны накачки превышает критическую частоту слоя F2 на 1.0–2.0 МГц, т. е. волна накачки не отражается от ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера, F-область, КВ волна накачки, поляризация, высокая эффективность мощность излучения, нелинейные нерезонансные явления.

Abstract. The lecture presents the investigation results of phenomena in the upper ionosphere (F region) induced by HF pump waves of the ordinary (O-mode) and extraordinary (X-mode) polarization at high effective radiated power (P_{eff} > 250 MW). The main attention is paid to the non-linear non-resonance phenomena occurring at pump frequencies exceeding the critical frequency of the F2 layer by 1.0–2.0 MHz, when the pump wave is not reflected from the ionosphere.

Keywords: ionosphere, F region, HF pump wave, polarization, high effective radiated power, non-linear non-resonance phenomena.

Введение

Изучение особенностей взаимодействия мощных радиоволн КВ-диапазона (волн накачки) с ионосферной плазмой относится к числу интенсивно развиваемых направлений исследований физики ионосферы и солнечно-земных связей. Экспериментальные и теоретические исследования по модификации F-области ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона, излучаемыми с поверхности Земли, позволяют изучать широкий спектр нелинейных явлений, механизмы возбуждения турбулентностей и плазменных волн, плазменные и гиромагнитные резонансы, механизмы ускорения электронов. Такие исследования позволили обнаружить ряд новых нелинейных явлений, существенных для понимания взаимодействия мощных радиоволн с ионосферой и их влияния на распространение радиоволн, физики ионосферы и ионосферно-магнитосферного взаимодействия, создания новых методов диагностики ионосферы, а также для различных практических приложений.

В лекции рассмотрены результаты исследования особенностей поведения и характеристик нелинейных явлений, возникающих при воздействии на F-область ионосферы мощными КВ-радиоволнами (волнами накачки) обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризаций при высокой эффективной мощности излучения ($P_{эфф}$ > 250 МВт). Выполнено также сравнение эффектов воздействия при низких ($P_{эфф}$ < 250 МВт) и высоких ($P_{эфф}$ > 250 МВт) мощностях излучения. Основное внимание уделено практически неизученным нелинейным нерезонансным явлениям в условиях при $P_{эфф}$ > 250 МВт, когда частота волны накачки превышает критическую частоту слоя F2 на 1.0–2.0 МГц, т. е. при излучении волны накачки «на просвет».

Результаты исследований базируются на данных многочисленных экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на нагревном КВ-стенде EISCAT/Heating в г. Тромсе, Норвегия (69.6° N, 19.2° E) [Rietveld et al., 2016]. В период экспериментов мощная КВ-радиоволна О- или Х-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита (диаграмма направленности антенн наклонена на 12° к югу) на частотах в диапазоне f_H = 4.0–8.0 МГц при эффективной мощности излучения $P_{эфф}$ = 120–900 МВт. Для выбора и контроля частот волны накачки использовался ионозонд в Тромсе. Для диагностики эффектов воздействия использовался радар некогерентного рассеяния EISCAT (930 МГц) [Rishbeth, van Eyken, 1993], пространственно совмещенный с нагревным стендом, КВ когерентный радар CUTLASS в Финляндии (63° N, 27° E) [Lester et al., 2004], расположенный в ~ 1000 км к югу от нагревного стенда, а также средства дистанционной диагностики в обсерватории ААНИИ вблизи г. С.-Петербург [Калишин и др., 2021] на расстоянии 1200 км от стенда EISCAT/Heating.

Эффекты воздействия на частотах $f_H < f_oF2$ при $P_{эфф}$ > 250 МВт

Ниже кратко рассмотрены особенности поведения и характеристики нелинейных явлений в F-области ионосферы при воздействии мощными КВ-радиоволнами О- и Х-поляризации при высокой эффек-

тивной мощности излучения ($P_{эфф}$ > 250 МВт) в условиях отражения волны накачки от ионосферы. Начиная с 70-х гг. прошлого века на всех нагревных КВ-стендах мира выполнялось изучение нелинейных резонансных явлений в F-области ионосферы, инициированных волнами накачки О-поляризации, при сравнительно низких эффективных мощностях излучения $P_{эфф}$ < 250 МВт. Результаты этих экспериментальных и теоретических исследований суммированы в обзорах, например, [Robinson, 1989; Streltsov et al., 2018; Гуревич, 2007; Грач и др., 2016, Фролов, 2017] (см. также ссылки там). Пороги возбуждения этих явлений сравнительно невысокие. Так, пороги возбуждения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) по данным экспериментов на стенде EISCAT/Heating составляют $P_{МИИН}$ = 8–26 МВт в зависимости от частоты волны накачки [Bryers et al., 2013]. Возбуждение стрикционной неустойчивости (параметрической распадной неустойчивости, parametric decay instability, PDI), когда мощная электромагнитная волна (ЕМ) трансформируется в продольные плазменные волны (ленгмюровские (LW) и ионно-акустических (IAW)), ЕМ → LW + IAW. PDI развивается в первые 100 мс нагрева вблизи высоты отражения О-волны накачки [Hagfors et al., 1983] при пороговых мощностях P_{PDI} = 20–40 МВт [Stubbe, 1996]. При О-нагреве после возбуждения PDI начинают развиваться МИИН, которые подавляют развитие LW и IAW и блокируют дальнейшее возбуждение PDI [Stubbe, 1996]. Тем не менее при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эфф}$ > 250 МВт) после «классической» PDI, развивающейся как мгновенный отклик на включение нагревного стенда, возможно возобновление генерации LW и IAW, которые существуют одновременно с МИИН в течение всего нагревного цикла. Пороги возобновления возбуждения LW и IAW после «классической» PDI составляют $P_{пор}$ = 325 и 445 МВт соответственно [Blagoveshchenskaya et al., 2020].

Начиная с 2010 г. по данным многочисленных экспериментов на стенде EISCAT/Heating с использованием многоинструментальной диагностики обнаружено, что мощная КВ-радиоволна Х-поляризации, излучаемая в направлении магнитного зенита, вызывает разнообразные нелинейные явления в F-области ионосферы (см. обзор [Благовещенская и др., 2026] и ссылки там). Было установлено, что пороги возбуждения МИИН при Х-нагреве лежат в пределах $P_{МИИН}$ = 40–150 МВт [Благовещенская и др., 2019], что превышает пороги возбуждения МИИН при О-нагреве. При этом характеристики МИИН при Х-нагреве и О-нагреве существенно различаются. Однако при Х-нагреве максимальные интенсивности плазменных LW и IAW выше более чем на порядок, а пороговые мощности возбуждения, наоборот, меньше, чем при О-нагреве (см. рис. 1). Следует отметить, что развитие PDI при Х-нагреве после включения нагревного стенда принципиально отличается от развития PDI при О-нагреве. Отклик на включение в первые 100 мс отсутствует. Развитие PDI постепенно начинается через 30–40 с после включения, достигает насыщения через ~ 1 мин и сопровождается генерацией МИИН в течение всего нагревного цикла. Пороговые мощности возбуждения LW составляют $P_{Lпор}$ ≈ 180 МВт, а IAW — $P_{IAпор}$ = 315 МВт [Blagoveshchenskaya et al., 2020].

На рис. 1 приведено высотно-временное поведение интенсивностей усиленных нагревом плазменных линий (HFPL), а также усиленных нагревом ионных линий, смещенных вниз и вверх по частоте ($HFIL_{Down}$ и $HFIL_{Up}$), в случаях О- и Х-нагрева при ступенчатом изменении $P_{эфф}$ от 56 до 560 МВт.

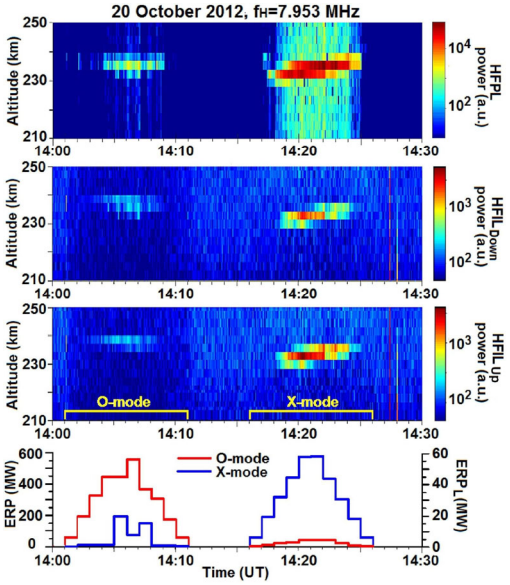

Рис. 1. Высотно-временное распределение интенсивностей HFPL, $HFIL_{Down}$ и $HFIL_{Up}$ по данным EISCAT радара HP (930 МГц) 20 октября 2012 г. при ступенчатом возрастании эффективной мощности излучения от 56 до 560 МВт и затем уменьшении до 56 МВт в цикле нагрева. Мощная КВ-радиоволна О- или Х-поляризации излучалась на частоте 7.953 МГц в магнитный зенит циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза [Blagoveshchenskaya et al., 2020]

Характерной особенностью, наблюдавшейся только при Х-нагреве, является впервые обнаруженное возбуждение узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) в полосе ±1 кГц относительно частоты волны накачки, которое регистрировалось на удалении ~1200 км от нагревного стенда [Kalishin et al., 2021]. Пороги возбуждения УИРИ при Х-нагреве, направленном в магнитный зенит, составляют $P_{УИРИ}$ = 80–90 МВт. По мере возрастания $P_{эфф}$ наблюдались увеличение количества дискретных спектральных линий и рост их интенсивностей. Окончательное формирование спектра УИРИ происходило при $P_{эфф}$ = 284–291 МВт [Калишин и др., 2023].

Эффекты воздействия на частотах $f_H > f_oF2$ при $P_{эфф}$ > 250 МВт

Рассмотрим особенности возбуждения и характеристики нелинейных явлений в F-области ионосферы при воздействии мощными КВ-радиоволнами О- и Х-поляризации при высокой эффективной мощности излучения ($P_{эфф}$ > 250 МВт) в условиях излучения волны накачки «на просвет». Это реализуется, когда

при вертикальном или близком к нему излучении частота волны накачки О-поляризации превышает критическую частоту обыкновенной компоненты слоя F2 ($f_H > f_oF2$), а частота мощной волны Х-поляризации становится больше критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2 ($f_H > f_xF2 = f_oF2+f_{ce}/2$, где f_{ce} — гирочастота электронов).

На рис. 2 показано поведение электронной плотности и температуры (N_e и T_e), интенсивности МИИН на частоте ~ 16 МГц, а также спектрограмма УИРИ в период эксперимента 23 октября 2013 г. Мощные КВ-радиоволны О- или Х-поляризации излучались в магнитный зенит на частоте 7.1 МГц при $P_{эфф}$ = 705 МВт с 17:38:30 по 17:43:30 UT и с 17:53:30 по 17:58:30 UT соответственно на частотах, превышающих f_oF2 на 1.0–1.5 МГц. Для сравнения также приведено поведение тех же параметров при О-нагреве в условиях отражения волны накачки от F2-слоя в цикле с 17:31 по 17:36 UT ($f_H = f_oF2$).

Как следует из рис. 2, при О-нагреве F-области ионосферы, направленном в магнитный зенит, при высоких эффективных мощностях излучения на частотах, превышающих f_oF2, происходит образование дактов повышенной электронной плотности N_e, генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы, зарегистрированного вблизи С.-Петербурга на удалении 1200 км от нагревного стенда EISCAT/Heating. Поведение и характеристики МИИН и спектральной структуры УИРИ при О-нагреве в условиях, когда волна накачки не отражается от ионосферы, являются типичными для Х-нагрева высокоширотной F-области ионосферы [Благовещенская и др., 2023]. Это дает основания полагать, что в рассматриваемых условиях происходила трансформация обыкновенной волны в необыкновенную. Сравнение характеристик дактов повышенной электронной плотности, МИИН и спектральной структуры УИРИ при альтернативном О-/Х- нагреве, направленном в магнитный зенит, при высоких $P_{эфф}$ на частотах, превышающих критическую частоту слоя F2 на 1.0–1.5 МГц, показало, что в целом их поведение имеет одинаковый характер.

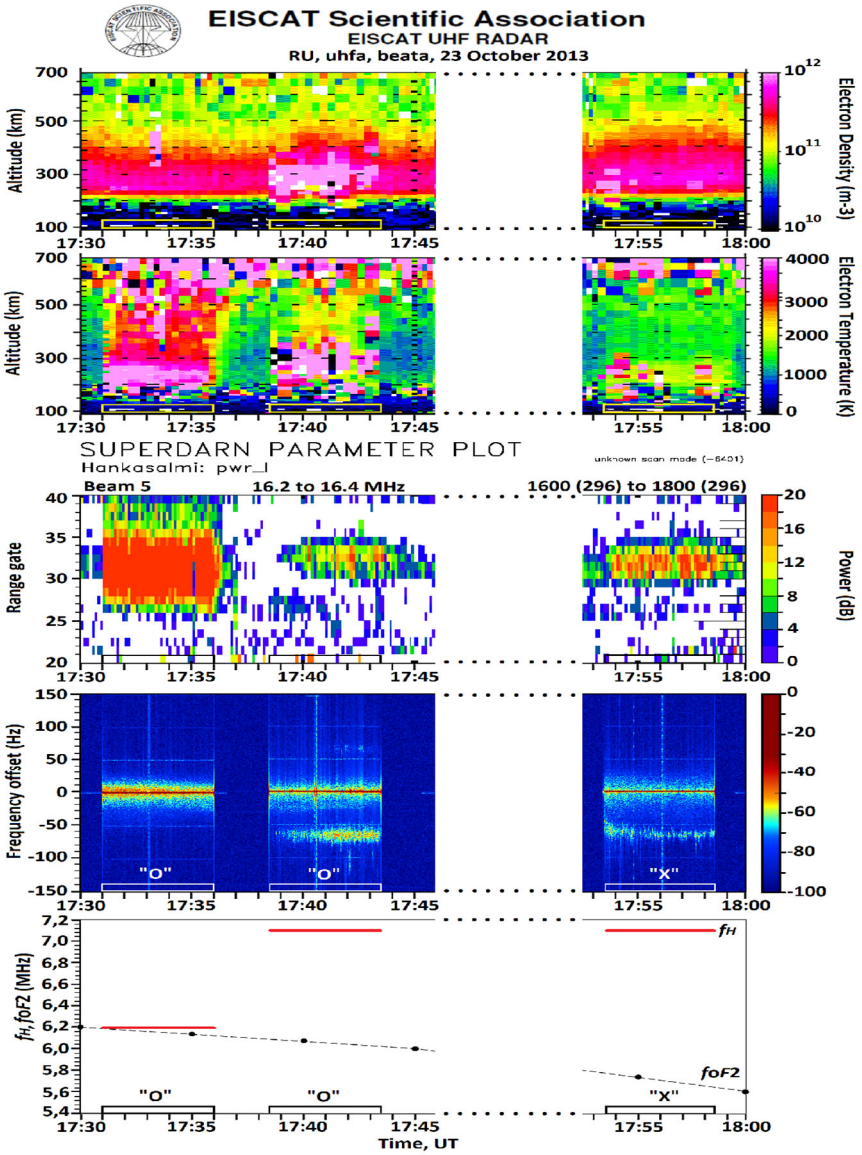

Рис. 2. Поведение N_e и T_e, интенсивности МИИН на частоте ~16 МГц, а также спектрограмма УИРИ при альтернативном О-/Х-нагреве, направленном в магнитный зенит, на частоте 7.1 МГц при $P_{эфф}$ = 705 МВт 23 октября 2013 г. На нижней панели

показан временной ход f_oF2 и используемые частоты нагрева

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях возрастает интенсивность исследований искусственных возмущений и нелинейных явлений в ионосфере как на зарубежных нагревных КВ-стендах HAARP (Аляска, США) и EISCAT/Heating (северная Норвегия), так и на российском стенде СУРА (пос. Васильсурск, Нижегородская область). Следует особо отметить, что на базе Института солнечно-земной физики СО РАН началось создание нагревного КВ-стенда нового поколения ИКАР-АИ [Васильев и др., 2020]. Стенд создается в составе Национального гелиогеофизического комплекса Российской академии наук (НГК РАН), который включает кластер передовых диагностических инструментов для исследования верхней атмосферы Земли и околоземного космического пространства [Жеребцов, 2020], что открывает принципиально новые возможности при проведении экспериментов на стенде ИКАР-АИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С. и др. Характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей в высокоширотной F- области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ-радиоволн необыкновенной поляризации // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59, № 6. С. 759–773. DOI: 10.1134/S001679401906004X.

Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С., Борисова Т.Д. и др. Нелинейные явления в F-области ионосферы при воздействии мощными радиоволнами КВ-диапазона необыкновенной поляризации // Успехи физ. наук. 2026. Т. 69, № 8. DOI: 10.3367/UFNr.2026.03.040115.

Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С., Борисова Т.Д. и др. Явления в высокоширотной F-области ионосферы при воздействии мощными радиоволнами КВ диапазона на частотах выше критической частоты слоя F2 // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т. 63, № 6. С. 775–787.

Васильев Р.В., Сетов А.Г., Фролов В.Л. и др. Современный нагревный стенд для исследования ионосферы средних широт // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 61–78. DOI: 10.12737/szf-62202005.

Грач С.М., Сергеев Е.Н., Мишин Е.В., Шиндин А.В. Динамические характеристики плазменной турбулентности ионосферы, инициированной воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения // Успехи физ. наук. 2016. Т. 186, № 11. С. 1189–1228.

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

Жеребцов Г.А. Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 6–18. DOI: https://doi.org/10.12737/szf-62202001.

Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д. и др. Характеристики узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы в зависимости от эффективной мощности излучения нагревного стенда EISCAT/Heating // Космические исследования. 2023. Т. 61, № 6. С. 476–485.

Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Рогов Д.Д. Дистанционные методы диагностики эффектов воздействия высокоширотных нагревных комплексов // Метеорология и гидрология. 2021. № 4. С. 22–36.

Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2017. 468 с.

Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., et al. Distinctive features of Langmuir and Ion-acoustic turbulences induced by O- and X-mode HF pumping at EISCAT // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2020. V. 125, N 7. DOI: https://doi.org/10.1029/2020JA028203.

Bryers C., Kosch M., Senior A., et al. The thresholds of ionospheric plasma instabilities pumped by high-frequency radio waves at EISCAT // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2013. V. 118. P. 7472–7481.

Hagfors T., Kofman W., Kopka H., et al. Observations of enhanced plasma lines by EISCAT during heating experiments // Radio Sci. 1983. V. 18. P. 861–866.

Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. Ion Gyro Harmonic Structures in Stimulated Emission Excited by X-Mode High Power HF Radio Waves at EISCAT // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2021. V. 126, N 8. DOI: 10.1029/2020JA028989.

Lester M., Chapman P.J., Cowley S.W.H., et al. Stereo CUTLASS: A new capability for the SuperDARN radars // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 459–473.

Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // Radio Sci. 2016. V. 51, N 9. P. 1533–1546.

Rishbeth H., van Eyken T. EISCAT: Early history and the first ten years of operation // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 1993. V. 55. P. 525–542.

Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // Physics Reports. 1989. V. 179. P. 79–209.

Streltsov A.V. et al. Past, present and future of Active Radio Frequency Experiments in Space // Space Sci. Rev. 2018. V. 214, 118. DOI: https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7.

Stubbe, P. Review of ionospheric modification experiments at Tromso // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 1996. V. 58, N 1-4. P. 349–368. DOI: https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00041-0.