

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021»

Характеристики искусственной ионосферной турбулентности в высокоширотной верхней (F-область) ионосфере при воздействии мощными КВ радиоволнами

Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова, А.С. Калишин

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», 199397, г. С. Петербург, ул. Беринга, 38, E-mail: nataly@aari.nw.ru

Выполнен анализ характеристик, особенностей эволюции во времени и порогов возбуждения искусственной ионосферной турбулентности в F-области высокоширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами нагревного стенда EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия). В период экспериментов нагревной стенд излучал на фиксированных частотах в диапазоне $f_H = 5.4 - 8.0$ МГц при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эфф} > 250$ МВт). Проведено сравнение эффектов, возникающих при O- и X-нагреве F-области высокоширотной ионосферы. Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, мощная КВ радиоволна, турбулентность, эксперимент, мощность излучения.

Features of artificial ionospheric turbulence in high-latitude upper (F-region) ionosphere induced by powerful HF radio waves

N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, A.S. Kalishin

The analysis of features, temporal evolution and excitation thresholds for the HF-induced turbulence in the high latitude ionospheric F-region has been carried out. The EISCAT/Heating facility at Tromsø, Norway was used for the ionospheric modification. In the course of experiments it run at high pump frequencies in the range $f_H = 5.4 - 8.0$ MHz under high effective radiated power ($P_{eff} > 250$ MW). The comparison between effects induced by the ordinary (O-mode) and extraordinary (X-mode) polarized HF pump waves in the high latitude ionosphere F-region was made. Keywords: high-latitude ionosphere, powerful HF radio wave, turbulence, experiment, radiated power.

Исследования особенностей взаимодействия мощных КВ радиоволн с ионосферной плазмой востребованы в различных областях. Среди них отметим физику ионосферной, солнечной и космической плазмы, астрофизику. Необходимо отметить важность подобного рода исследований для оценки влияния эффектов воздействия мощных КВ радиоволн на космическую погоду, для изучения нелинейных эффектов в лазерах, в определении предельных электромагнитных нагрузок на ионосферу, а также жизнеобеспечения деятельности человека в Арктических регионах. Следует также подчеркнуть, что искусственные ионосферные возмущения оказывают критическое влияние на работу радиотехнических систем различного назначения, включая загоризонтную радиолокацию, системы связи (в том числе и спутниковые) и приводят к навигационным ошибкам при использовании ГЛОНАСС и GPS.

Для модификации F-области ионосферы на всех КВ нагревных стендах мира, как правило, используются волны накачки обыкновенной поляризации (O-мода). Это вызвано тем, что радиоволны необыкновенной поляризации (X-мода) в фоновой (невозмущённой) ионосфере отражаются ниже высоты отражения мощной КВ радиоволны O-поляризации, и, более того, ниже области существования верхнегибридных плазменных волн. Вследствие этого они не могут вызвать генерацию этих волн, и как следствие, возбуждение искусственной ионосферной турбулентности и явлений, её сопровождающих (собственно плазменные волны, мелкомасштабные

искусственные ионосферные неоднородности, искусственное радиоизлучение ионосферы, оптическое излучение, и т. д.). Однако в начале 10-х г.г. по результатам экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на высокоширотном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия) было впервые обнаружено, что воздействие мощной КВ радиоволны X-поляризации на высокоширотную F -область ионосферы приводит к генерации искусственных возмущений, которые по интенсивности могут превосходить возмущения при O-нагреве [1 - 7].

Особое внимание привлекают исследования на высокоширотных КВ нагревных стендах HAARP и EISCAT/Heating. В высоких широтах в максимальной степени реализуется эффект магнитного зенита, что приводит к генерации искусственных возмущений ионосферной плазмы значительно более сильных, чем в средних широтах. Необходимо также отметить, что существующие высокоширотные КВ нагревные стенды позволяют проводить исследования при очень высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эфф} > 250$ МВт), когда реализуется возможность возбуждения явлений, принципиально недостижимых при $P_{эфф} < 250$ МВт. Так на стенде HAARP впервые была показана возможность создания дополнительных слоев ионизации и исследованы механизмы их генерации [8].

Целью данной работы является анализ характеристик искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), возбуждаемой в F -области высокоширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами на высоких частотах нагрева $f_H = 5.4 - 8.0$ МГц при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эфф} > 250$ МВт). Будет также выполнено сравнение эффектов, возникающих при O- и X-нагреве F -области высокоширотной ионосферы.

Описание экспериментов. Модификации высокоширотной F -области ионосферы мощными КВ радиоволнами осуществлялась с использованием КВ нагревного стенда EISCAT/Heating (69.6° N, 19.2° E, $L=6.2$, $I=78^\circ$), в г. Тромсе, северная Норвегия. Эксперименты выполнялись в 2010 – 2016 г.г. в дневные и вечерние часы. Мощная КВ радиоволна обыкновенной (O-мода) или необыкновенной (X-мода) поляризаций излучалась на высоких частотах от 5.4 до 8.0 МГц в направлении магнитного зенита (диаграмма направленности антенны стенда EISCAT/Heating была наклонена на 12° от вертикали к югу). Излучение проводилось при высокой эффективной мощности излучения $P_{эфф} = 400 - 800$ МВт. Просачивание O-волны при X-нагреве и X-волны при O-нагреве не превышала 1%.

В качестве основного диагностического средства эффектов воздействия использовался EISCAT радар некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц [9], пространственно совмещенный с нагревным стендом. Измерения с помощью радара НР выполнялись в диапазоне высот от 90 до 700 км с разрешением по времени 5 с и разрешением по высоте 1.5 или 3 км. Измерения выполнялись в направлении магнитного поля в Тромсе (магнитный зенит). Для диагностики мелкомасштабных искусственных неоднородностей (МИИН) использовался когерентный КВ радар CUTLASS (SuperDARN) [10] в Финляндии (63° N, 27° E), находящийся примерно на 1000 км южнее КВ нагревного комплекса в Тромсе. CUTLASS излучал на узконаправленную антенну с шириной луча $\sim 3.3^\circ$, ориентированную на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсе («луч» 5). Измерения проводились на трех частотах с разрешением по дальности 15 км. Выбор и контроль частот нагрева осуществлялся по данным ионозонда в Тромсе.

Результаты. При включении КВ нагревного стенда мощная электромагнитная (EM) волна обыкновенной поляризации (O-мода) вблизи высоты отражения трансформируется в высокочастотную ленгмюровскую (LW) и низкочастотную ионно-акустическую (IAW) плазменные волны, $EM \rightarrow LW + IAW$. Этот процесс происходит в

первые ~ 100 мс нагрева и называется параметрической распаднoй неустойчивостью (parametric decay instability, PDI) [11]. Радар некогерентного рассеяния радиоволн (НР), пространственно совмещенный с КВ нагревным стендом, является единственным диагностическим инструментом позволяющим непосредственно идентифицировать возбуждение ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн по появлению плазменных линий на частоте нагрева (HF-induced plasma lines, HFPL) и усиленных нагревом ионных линий (HF-enhanced ion lines, HFIL) в спектрах рассеянных сигналов на первом 5 с шаге измерений. В наших экспериментах использовался радар НР, работающий на частоте 930 МГц, что обеспечивало обнаружение турбулентностей с масштабами $L = 0.16$ м ($L = c/2f_{\text{rad}}$, где c – скорость света, f_{rad} – частота радара). Как показали результаты многочисленных экспериментов ААНИИ, возбуждение PDI происходит не только при O-нагреве, но и при воздействии на высокоширотную ионосферу мощной КВ радиоволны X-поляризации [2 – 7].

Представляет интерес сравнить развитие PDI при O- и X-нагреве после включения КВ нагревного комплекса. Такое сравнение было сделано для двух последовательных O/X циклов нагрева на частоте $f_H = 7.1$ МГц 21 февраля 2013 г. (см. рис. 1). Нагрев проводился на частоте вблизи критической частоты слоя $F2$ ($f_H \sim foF2$) при эффективной мощности излучения $P_{\text{эфф}} = 530$ МВт. Из рис. 1 ясно видно, что включение O-нагрева сопровождалось резким возрастанием мощностей HFPL и HFIL, которые достигли максимума уже на первом 5 с интервале измерений, а затем затухали в течение нескольких последующих 5 с интервалах измерений радара НР. Такое поведение HFPL и HFIL является типичным для классической резонансной параметрической распаднoй неустойчивости (PDI) при обычно используемых в экспериментах эффективных мощностях излучения $P_{\text{эфф}} < 250$ МВт [10]. Однако при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{\text{эфф}} > 250$ МВт) возможно возобновление возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических волн, которое продолжалось непрерывно до окончания цикла O-нагрева [5 - 7]. Такое поведение ионно-акустических плазменных волн (усиленных нагревом ионных линий, HFIL) наблюдалось в эксперименте 21 февраля 2013 г. (см. рис. 1).

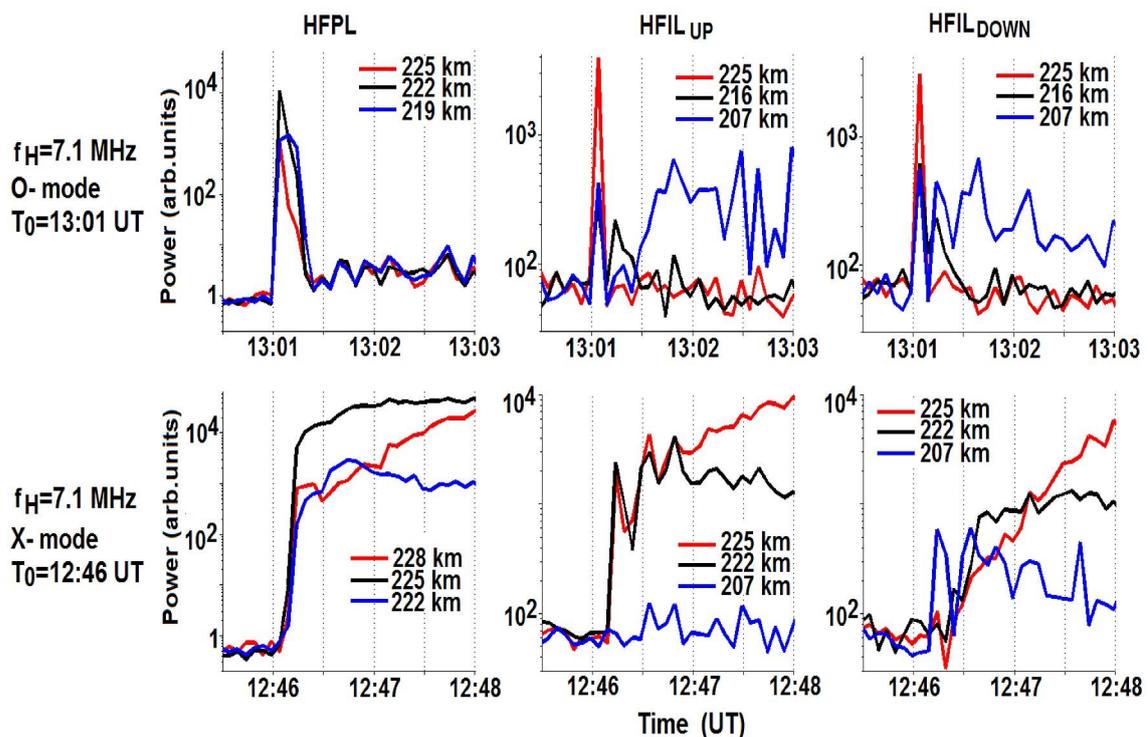


Рис.1. Поведение мощностей усиленных нагревом плазменных линий (HFPL), усиленных нагревом сдвинутых вверх и вниз по частоте ионных линий (HFIL_{UP} и HFIL_{DOWN}) с 5 с разрешением по времени при О- и Х-нагреве на частоте 7.1 МГц 21 февраля 2013 г., начиная за 30 с до включения стенда EISCAT/Heating и в течение первых двух мин нагрева. Мощности HFPL, HFIL_{UP} и HFIL_{DOWN} приведены на трех фиксированных высотах, на которых они имели максимальные значения.

При Х-нагреве развитие HFPL и HFIL принципиально отличалось от О-нагрева. Из рис.1 следует, что эффекты включений в поведении усиленных нагревом плазменных и ионных линий не регистрировались. HFPL и HFIL появлялись только через 15 – 20 с после включения, затем их интенсивность постепенно возрастала, достигая насыщения через 50 – 70 с после включения нагревного комплекса. Мощности HFPL и HFIL в циклах Х-нагрева были существенно выше по сравнению с О-нагревом. Они регистрировались в течение всего цикла нагрева и сосуществовали с мелкомасштабными искусственными ионосферными неоднородностями (МИИН). Следует отметить, что в отличие от О-нагрева, когда возбуждение HFPL и HFIL возможно только при нагреве на частотах $f_H \leq f_oF2$, при Х-нагреве генерация HFPL и HFIL происходит на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты слоя F2 ($f_H \leq f_oF2$ и $f_H > f_oF2$). Усиленные нагревом плазменные и ионные линии (HFPL и HFIL) при Х-нагреве на частотах $f_H > f_oF2$ наблюдались в диапазоне между f_oF2 и f_xF2 , где f_xF2 - критическая частота необыкновенной компоненты слоя F2 ($f_xF2 = f_oF2 + f_{ce}/2$, где f_{ce} - гирочастота электронов).

Сравним поведение усиленных нагревом плазменных и ионных линий (HFPL и HFIL) при Х-нагреве на частотах ниже и выше критической частоты слоя F2 ($f_H < f_oF2$ и $f_H > f_oF2$). На рис. 2 приведены высотные профили интенсивностей HFPL и HFIL 25 октября 2013 г. в цикле нагрева 16:16 – 16:21 UT ($f_H < f_oF2$) и 16:53:30 – 16:58:30 UT ($f_H > f_oF2$). Как следует из рис.2, интенсивности HFPL и HFIL при Х-нагреве на частоте $f_H > f_oF2$ были ниже, чем в случае $f_H < f_oF2$). При этом диапазон высот, в котором возбуждались усиленные нагревом плазменные и ионные линии, при $f_H > f_oF2$ (220 - 270 км) был существенно больше по сравнению со случаем $f_H < f_oF2$ (215 - 240 км).

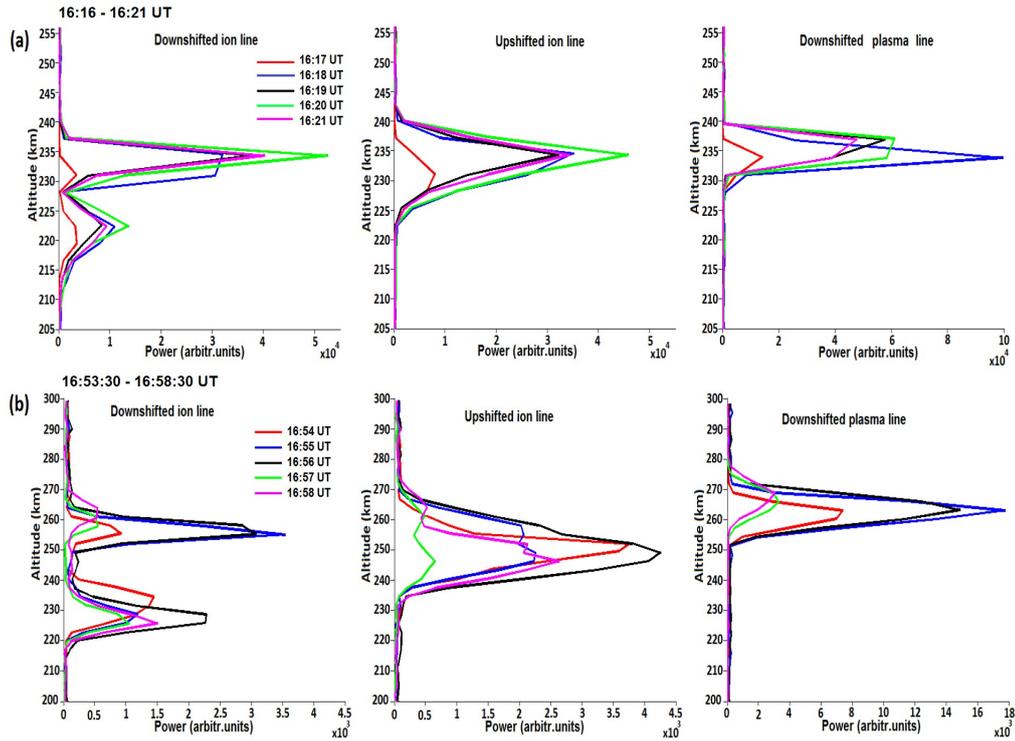


Рис. 2. Высотные профили мощностей усиленных нагревом сдвинутых вниз и вверх по частоте ионных линий (HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP}), усиленных нагревом плазменных линий (HFPL), при X-нагреве на частоте 7.1 МГц 25 октября 2013 г.: (а) в цикле нагрева 16:16 – 16:21 UT ($f_H < f_o F2$); (б) 16:53:30 – 16:58:30 UT ($f_H > f_o F2$).

По данным экспериментов на стенде EISCAT/Heating при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения выполнен анализ характеристик и порогов возбуждения ленгмюровских (LW) и ионно-акустических (IAW) плазменных волн при воздействии мощных КВ радиоволн О- и Х-поляризации на высокоширотную F-область ионосферы. На рис. 3 показано высотное-временное распределение интенсивностей плазменных линий (HFPL), а также интенсивностей сдвинутых вниз и вверх по частоте усиленных нагревом ионных линий (HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP}), по данным измерений EISCAT радара (933 МГц) НР с разрешением 5 с по времени и 3 км по высоте 20 октября 2012 г. Альтернативный О-/Х нагрев производился в направлении магнитного зенита на частоте 7.953 МГц. $P_{эфф}$ ступенчато возрастала от 58 до 560 МВт, а затем возвращалась к 56 МВт. Обнаружено, что при Х-нагреве HFPLs и HFILs появлялись при $P_{эфф} = 190$ и 316 МВт соответственно. Используя выражение $E = 0.25 \sqrt{P_{эфф}} / R$ (здесь E в В/м, $P_{эфф}$ в кВт и R в км) [12], значения электрического поля, при котором начинают возбуждаться ленгмюровские и ионно-акустические плазменные волны (без учета поглощения и рефракции), составляют $E_L = 0.47$ и $E_{IA} = 0.61$ В/м.

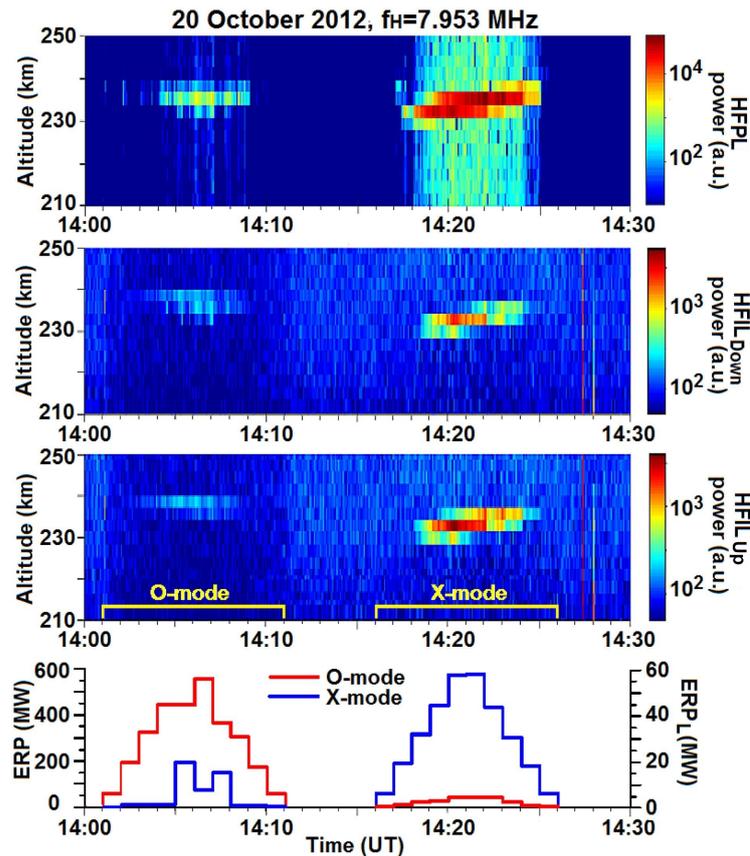


Рис. 3. Высотно-временное распределение интенсивностей HFPL, HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP} по данным измерений EISCAT радара (933 МГц) HP с разрешением 5 с по времени и 3 км по высоте 20 октября 2012 г. Альтернативный O-/X нагрев производился в направлении магнитного зенита на частоте 7.953 МГц. Эффективная мощность излучения ступенчато возрастала от 58 до 560 МВт, а затем возвращалась к 56 МВт. Изменения ERP, а также мощностей просачивания (ERP_L) X-волны при O-нагреве и O-волны при X-нагреве приведены на нижней панели.

При O-нагреве при высоких эффективных мощностях излучения после развития «классической» стрикционной неустойчивости, регистрируемой как непосредственный отклик на момент включения нагревного стенда, происходит повторное возбуждение ленгмюровской и ионно-акустической турбулентностей (HFPLs и HFILs), которые «не гасятся» развившимися мелкомасштабными искусственными ионосферными неоднородностями и наблюдается в течение цикла нагрева. Пороги их возбуждения при O-нагреве выше, чем при X-нагреве, и составляли 0.62 and 0.73 В/м соответственно.

Результаты выполненных исследований продемонстрировали принципиальное различие в развитии и порогах возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн (усиленных нагревом плазменных и ионных линий в спектрах сигналов EISCAT радара некогерентного рассеяния, HFPL и HFIL) при O- и X-нагреве высокоширотной F-области ионосферы. Показано, что при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эфф} > 250$ МВт) при O-нагреве после развития «классической» параметрической распадной неустойчивости происходит возобновление возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических волн.

Литература

1. *Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Yeoman T. et al.* Artificial field-aligned irregularities in the high-latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. doi: 10.1029/2011GL046724.
2. *Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kosch M., et al.* Optical and Ionospheric Phenomena at EISCAT under Continuous X-mode HF Pumping // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. V. 119. P. 10483–10498. doi:10.1002/2014JA020658.
3. *Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. et al.* Modification of the high latitude ionosphere F region by X-mode powerful HF radio waves: Experimental results from multi-instrument diagnostics // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015. V. 135. P. 50–63.
4. *Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kalishin A.S. et al.* First observations of electron gyro-harmonic effects under X-mode HF pumping the high latitude ionospheric F-region // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2017. V. 155. P. 36–49.
5. *Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K.,* Comment on the article “Parametric Instability Induced by X-Mode Wave Heating at EISCAT” by Wang et al. (2016) // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122. P. 12,570 – 12,586. <https://doi.org/10.1002/2017JA023880>.
6. *Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kalishin A.S., Yeoman T. K., Häggström I.,* 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. №7. <https://doi.org/10.1029/2020JA028203>.
7. *Blagoveshchenskaya N. F.,* Perturbating the High-Latitude Upper Ionosphere (*F* Region) with Powerful HF Radio Waves: A 25-Year Collaboration with EISCAT // *Radio Science Bulletin.* 2020. № 373 (June 2020). P. 40 – 55. doi:10.23919/URSIRSB.2020.9318436
8. *Mishin E., Watkins B., Lehtinen N., Eliasson B., Pedersen T., Grach S.,* Artificial ionospheric layers driven by high-frequency radiowaves: An assessment // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2016. V.121, doi:10.1002/2015JA021823.
9. *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.
10. *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.
11. *Гуревич А.В.* Нелинейные явления в ионосфере // *Успехи физических наук.* 2007 Т.177. №11. С. 1145 – 1177.
12. *Robinson T.R.* The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // *Physics Reports.* 1989. V. 179. P. 79 – 209.