

УДК: 087.2 + 537.87

DOI: 10.26907/rwp29.2025.612-615

ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА НАГРЕВНЫХ СТЕНДАХ МЕТОДОМ СОЗДАНИЯ ИПН

Н.В. Бахметьева, Г.И. Григорьев, Е.Е. Калинина, И.Н. Жемяков, А.А. Лисов

Научно-исследовательский радиофизический институт

Нижегородского государственного университета, Нижний Новгород, Россия

E-mail: nv_bakhm@nirfi.unn.ru

Аннотация. Обсуждаются результаты и возможности исследования ионосферы и нейтральной атмосферы на основе создания искусственных периодических неоднородностей (ИПН) ионосферной плазмы под воздействием мощного КВ радиоизлучения нагревного стенда СУРА. Приводятся примеры реализации метода ИПН на других нагревных стендах.

Ключевые слова: ионосфера, плазма, нагревный стенд, искусственные периодические неоднородности, электронная концентрация, вертикальная скорость, температура, турбулентность, внутренние гравитационные волны.

PERSPECTIVES OF THE LOWER IONOSPHERE RESEARCH BY API TECHNIQUE USING HEATING FACILITIES

N.V. Bakhmetieva, G.I. Grigoriev, E.E. Kalinina, I.N. Zhemyakov, A.A. Lisov

Abstract. The results and possibilities of the studies of the ionosphere and neutral atmosphere based on the creation of artificial periodic irregularities (APIs) of ionospheric plasma under the impact of the powerful HF radio emission from the SURA heating facility are discussed. Examples of the implementation of the API technique on other heating facilities are given.

Keywords: ionosphere, plasma, heating facility, artificial periodic irregularities, electron density, temperature, turbulence, internal gravity waves.

Введение

Число публикаций по тематике модификации верхней ионосферы давно перевалило за тысячу. В то же время количество исследований воздействия на нижнюю ионосферу существенно меньше. В первую очередь, это обусловлено трудностями экспериментальных исследований нижней ионосферы, сложной фотохимией и динамикой этой области высот. С другой стороны, свойства нижней ионосферы (высоты 50–150 км) являются определяющими для распространения радиоволн почти всех диапазонов, поскольку именно она вносят основной вклад в затухание радиоволн. В своих исследованиях мы учитываем, что основой «нагревных» методов исследований ионосферы служат знания о ее характеристиках в естественном, невозмущенном состоянии: ионизации, температуре, плотности, давлении, горизонтальной и вертикальной компонентах скорости плазмы, ионном составе и других параметрах.

Метод исследования ионосферы Земли на основе создания искусственных периодических неоднородностей ионосферной плазмы (ИПН) при возмущении ее мощным КВ радиоизлучением разработан в НИРФИ ННГУ. Впервые явление резонансного (брэгговского) рассеяния пробных радиоволн на ИПН наблюдалось в 1975 г. на нагревном стенде «Зименки», а в настоящее время его исследование активно развивается на базе стенда СУРА [1–7]. Впоследствии метод был реализован на других нагревных стендах [8–17]. Он основан на возмущении ионосферы мощным КВ радиоизлучением и создании ИПН в поле стоячей волны, образующейся при отражении от ионосферы мощной радиоволны, излучаемой в зенит синфазно работающими передатчиками стенда. Механизмы образования неоднородностей различны в разных областях ионосферы. Неоднородности рассеивают пробные радиоволны, и при выполнении условия брэгговского рассеяния приемная установка принимает сигнал с высоким соотношением сигнал/шум в результате синфазного сложения волн, рассеянных каждой неоднородностью [2, 7].

Анализ высотно-временных вариаций амплитуды и времени релаксации сигнала, рассеянного ИПН, на основе разработанных способов позволяет получать совокупность динамических характеристик атмосферы на ионосферных высотах – параметры атмосферных

волн и атмосферной турбулентности, определять уровень турбопаузы, определять ширину и глубину межслоевой E-F впадины в зависимости от гелиогеофизических условий и др. В этом плане метод ИПН диагностики практически не имеет конкуренции по совокупности определяемых в эксперименте параметров ионосферы и ее нейтральной компоненты.

Основные результаты исследований нижней ионосферы методом создания ИПН

В итоге многолетних экспериментов с использованием стенда СУРА как источника контролируемого возмущения в ионосфере методом резонансного рассеяния радиоволн на ИПН в разных природных условиях получены сведения о пространственно-временных характеристиках искусственного возмущения нижней ионосферы, уникальные данные о параметрах и динамике плазмы и нейтральной компоненты регулярной ионосферы – температуре, электронной концентрации, скорости вертикального движения плазмы, параметрах спорадического слоя E, включая его ионный состав, с высоким пространственно-временным разрешением [2, 7]. На рис. 1 приведены примеры высотно-временных зависимостей амплитуды сигнала, рассеянного ИПН, полученные сотрудниками НИРФИ ННГУ при проведении экспериментов по единой методике квазинепрерывного нагрева на стендах HAARP, Arecibo и СУРА [13, 15, 16]. В целом регистрации рассеянных сигналов при существенно разной мощности нагревных средств аналогичны и характеризуют быстрые процессы, происходящие в ионосфере. Они дают возможность экспериментально определить интервалы высот, в которых происходит смена механизмов образования ИПН в D, E, F-областях и межслоевой E-F впадине [7].

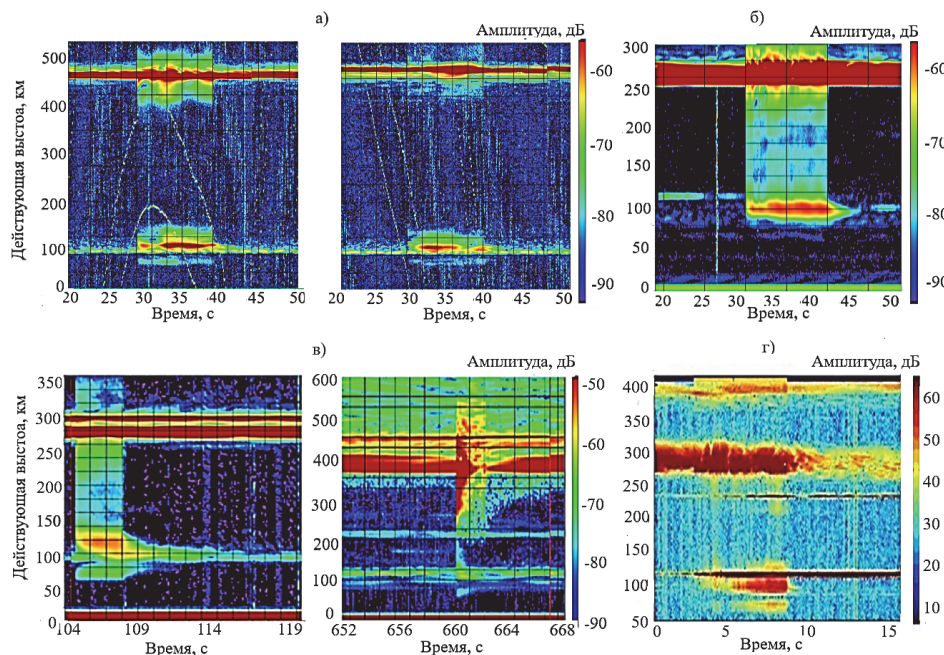


Рис. 1. Высотно-временная зависимость амплитуды сигнала, рассеянного ИПН, в экспериментах НИРФИ ННГУ на стендах HAARP в июне 2014 г. – а), Arecibo в ноябре 2018 г. – б), СУРА августе 2021 г. и октябре 2023 г. – в) и в июле 2006 г. – г)

Пример измерения скорости вертикального движения плазмы по фазе рассеянного сигнала приведен на рис. 2. Налицо глубокие вариации скорости по величине и направлению, которые обусловлены распространением атмосферных волн и естественной атмосферной турбулентностью [2, 3, 7]. Получено, что скорости турбулентного и регулярного вертикального движения близки по порядку величины и достигают нескольких м/с [7].

На основе полученных результатов коллектив ставит перед собой задачу продолжить исследования искусственно возмущенной области ионосферы, создаваемой мощным КВ радиоизлучением нагревного стенда СУРА, в том числе экспериментальные и теоретические исследования по диагностике ионосферы и нейтральной атмосферы методом ИПН. Будет продолжено исследование регулярной ионосферы, атмосферных волн и турбулентности,

спорадического слоя E и его влияния на образование ИПН в области D. Будут проведены новые эксперименты по исследованию параметров ИПН, процессов их развития и релаксации при создании неоднородностей радиоволнами обыкновенной и необыкновенной поляризаций.

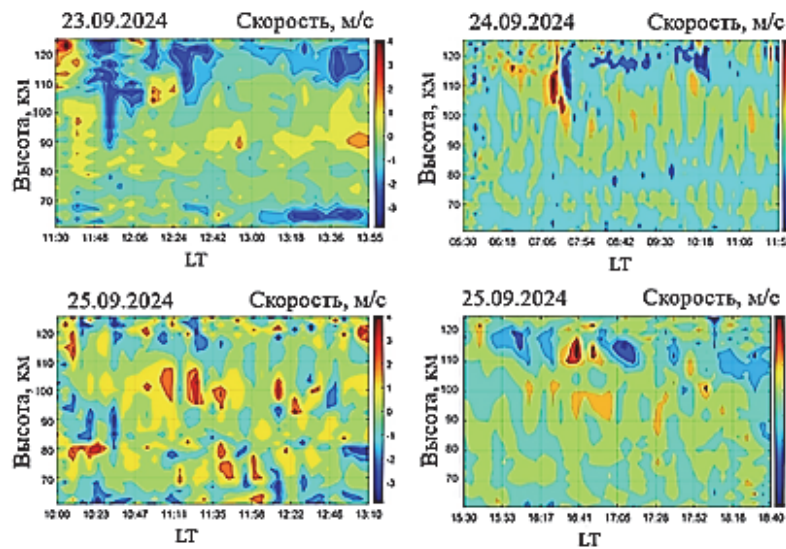


Рис. 2. Зависимость скорости вертикального движения плазмы от времени на высотах 60 – 125 км (отрицательные значения отвечают движению вверх)

В результате будут получены новые сведения о характеристиках E-F впадины, о структуре и динамике возмущенной области, скоростях распространения искусственного возмущения из области резонансного взаимодействия мощного излучения с ионосферной плазмой из области F на высоты нижней ионосферы, в том числе, о механизмах искусственного возмущения нижней ионосферы. Особое внимание уделяется исследованию феномена расслоения области D, условий его появления и определению характеристик. Это новый аспект исследования нижней ионосферы, доступный применению метода ИПН.

Задачи дальнейших исследований ионосферы и нейтральной атмосферы методом ИПН на нагревных стендах

Актуальность исследований ионосферы методом ИПН обусловлена важностью применения получаемых новых знаний об ионосфере и нейтральной атмосфере в прикладных задачах. Особенно это касается областей D и E, межслоевой E-F впадины (долины), которая может обеспечить волноводное (без отражения от земли) распространение коротких радиоволн, в том числе, на дальние расстояния, но практически недоступна традиционным методам. В этом плане метод исследования, основанный на создании и резонансном рассеянии радиоволн на ИПН дает уникальную возможность получать, а затем и использовать сведения о пространственно-временных свойствах и параметрах как невозмущенной ионосферы, так и нейтральной компоненты на ионосферных высотах с высоким пространственно-временным разрешением в разных широтно-долготных зонах, в том числе, с использованием высокоширотных стендов. Новые результаты экспериментальных исследований, полученные научным коллективом НИРФИ ННГУ и зарубежными коллегами, показывают, что отклик ионосферы на высокочастотный нагрев представляет собой более сложную картину, чем представлялось ранее [12, 14, 16, 17]. Например, эпизодически на некоторых высотах наблюдалась более длительная релаксация неоднородностей по окончании нагрева, чем обусловленная амбиполярной диффузией в E-области и зависимостью от температуры коэффициентов прилипания-отлипания электронов в области D. Это обуславливает важность решения задачи моделирования процессов, происходящих при образовании и релаксации неоднородностей, что необходимо для дальнейшего увеличения точности применения метода при определении параметров ионосферы и нейтральной атмосферы, для более полного понимания результатов настоящих экспериментов и разработки оптимальных условий проведения экспериментов в будущем [2, 4, 6, 17].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту № 25–27–00031.

Список литературы

1. Belikovich V.V., Benediktov E.A., Getmantsev G.G., Ignat'ev Yu.A., Komrakov. G.P. Scattering of radio waves from the artificially perturbed F region of the ionosphere // JETP Letters. – 1975. – V. 22. – No 10. – P. 243–244.
2. Belikovich V.V., Benediktov E.A., Tolmacheva A.V., Bakhmet'eva. N.V. Ionospheric Research by Means of Artificial Periodic Irregularities. – Copernicus GmbH. Katlenburg-Lindau, Germany, 2002. –160 p.
3. Bakhmetieva N.V., Belikovich V.V., Benediktov E.A., Vyakhrev V.D., Goncharov N.P., Tolmacheva A.V., and Korotina G.S. Studies of the ionosphere and neutral atmosphere using artificial periodic inhomogeneities in the ionospheric plasma // Radio Science. – 1998. – Vol. 33. – No 3. – P. 583–594.
4. Belikovich V.V., Benediktov E.A. Investigation of the lower part of the D-region of the ionosphere using artificial periodic inhomogeneities // Radiophys. Quantum. Electron. – 1986. – Vol. 29. – No 11. – P. 963–973.
5. Belikovich, V.V., Benediktov, E.A., Bubukina, V.N. et al. Artificial periodic inhomogeneities and a model for the lower part of the D region. Radiophys. Quantum Electron. 1999. – Vol. 42. – No 5. – P. 382–387.
6. Belikovich V.V., Benediktov E.A., Trunov D.V. Height profiles of the amplitude and relaxation time of artificial periodic irregularities in the D region // Geomag. Aeron. – 2000. – V. 57. – No 6. – P. 733–738.
7. Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I. Study of the Mesosphere and Lower Thermosphere by the Method of Creating Artificial Periodic Irregularities of the Ionospheric Plasma // Atmosphere. – 2022. – Vol. 13. – No. 9. – P. 1346.
8. Feier J.A., Djuth F.T., Gonzales C.A. Bragg Backscatter From Plasma Inhomogeneities Due to a Powerful Ionospherically Reflected Radio Waves // J. Geophys. Res. – 1984. – Vol. 89. – No (A10). – P. 9145–9147.
9. Rietveld M.T., Turunen E., Matveinen H., Goncharov N.P., Pollari P. Artificial periodic irregularities in the auroral ionosphere // Ann. Geophys. – 1996. – Vol. 14. – No 12. – P. 1437–1453.
10. Rietveld M.T., Goncharov N.P. Artificial periodic irregularities from the Tromsø heating facility // Adv. Space Res. – 1998. – V.21. – No 5. – P. 693–696.
11. Djuth F.T., Groves K.M., Elder J.H., Shinn E.R., Quinn J.M., Villasenor J., Wong A.Y. Measurements of artificial periodic inhomogeneities at HIPAS observatory // J. Geophys. Res. – 1997. – Vol. 102. – No A11. – P. 24023–24035.
12. Vierinen J., Kero A., Rietveld M. T. High latitude artificial periodic irregularity observations with the upgraded EISCAT heating facility // JASTP. – 2013. – Vol. 105–106. – P. 253–261.
13. Grach S.M., Sergeev E.N., Bakhmetieva N.V., Milikh G., Shindin A.V. Preliminary Results of the Artificial Periodic Irregularities Excited by the HAARP HF Heater // Proceedings of the 14th Ionospheric Effects Symposium (IES2015) Alexandria, Virginia (USA), 2015. – URL: <https://ies2015.bc.edu/>
14. Hysell D.L., McCarrick M.J., Fallen C.T., and Vierinen J. (2015), First artificial periodic inhomogeneity at HAARP // Geophys. Res. Lett. – 2015. – V. 42. – No 5. – P. 1297–1033.
15. Bakhmetieva N.V., Grach S.M., Sergeev E.N., Shindin A.V., Milikh G.M., Siefring C.L., Bernhardt P.A., McCarrick M. Artificial periodic irregularities in the high-latitude ionosphere excited by the HAARP facility // Radio Sci. – 2016. – Vol. 51. – No 7. – P. 999–1009.
16. Бахметьева Н.В., Грач С.М., Сергеев Е.Н., Шиндин А.В. Результаты диагностики нижней ионосферы земли методом создания искусственных периодических неоднородностей в высоких, средних и низких широтах // Распространение радиоволн: труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции (Казань, 1–6 июля 2019 г.): в 2 т. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2019. – Т. II. – С. 16–20.
17. Hysell D. L., Rojas E. Modeling E-region artificial periodic inhomogeneity // Radio Science. – 2023. – Vol. 58. – No 6. – P. e2023RS007710.