

Результаты экспериментальных исследований пространственной структуры возмущённой области ионосферы

Фролов В.Л.

Научно-исследовательский радиофизический институт, Россия.

frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru

Эксперименты по модификации ионосферы Земли были начаты в России в середине 60-х годов прошлого столетия и активно продолжаются по настоящее время. Выполненные за прошедшие годы отечественные, а также зарубежные исследования привели к пониманию того (см., например, статьи в специальных выпусках журналов [1-9], обзоры [10-14] и цитируемую в них многочисленную литературу), что мощные КВ радиоволны O -поляризации, излучаемые в вертикальном или в близком к вертикальному направлении, приводят к нагреву ионосферной плазмы и возбуждают в F_2 -области ионосферы вблизи высоты их отражения интенсивную искусственную ионосферную турбулентность (ИИТ), которая включает в себя возмущения плотности и температуры плазмы, генерацию высокочастотных и низкочастотных плазменных колебаний, ускорение электронов до сверхтепловых энергий и вызванные ими оптические свечения нейтральной атмосферы и дополнительную её ионизацию, генерацию искусственного радиоизлучения, возбуждение перемещающихся ионосферных возмущений, генерацию искусственных периодических неоднородностей, генерацию низкочастотных излучений в ОНЧ-СНЧ-КНЧ диапазонах и др.

В настоящем докладе мы рассмотрим результаты экспериментальных исследований пространственной структуры возмущённой области ионосферы (ВО), которая формируется в результате развития, в силу тех или иных причин, искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН) различных масштабов. При этом свойства ИИН в сильной степени зависят от ионосферных условий (времени суток и естественного уровня возмущённости ионосферы), а также от характеристик мощной радиоволны (её частоты, мощности, поляризации и временного режима излучения).

В докладе представлены только результаты исследований, выполненных на среднеширотном нагревном стенде СУРА (ФГБНУ НИРФИ, Н. Новгород). Его описание можно найти в [14]. Для изучения характеристик ИИН используются различные методы их диагностики. Среди них: ионозондовые измерения, метод пробных волн, ракурсное рассеяние радиоволн КВ и УКВ диапазонов на вытянутых вдоль геомагнитного поля мелкомасштабных ($l_{\perp} \approx 1 - 200$ м) неоднородностях, просвечивание ВО ионосферы сигналами низкоорбитальных и высокоорбитальных навигационных ИСЗ, метод радиотомографии, оптические измерения, прямые измерения с борта ИСЗ и др.

В дневных условиях волна накачки (ВН) отражается, как правило, на высотах $\sim 180 - 220$ км. При наличии мощных D и E слоёв значительная доля её энергии поглощается в нижних слоях ионосферы. Это приводит к сильному разогреву плазмы и появлению кросс-модуляционных эффектов при распространении радиоволн [15,16]. При нагреве плазмы происходит нарушение ионизационно-рекомбинационного баланса, что вызывает увеличение плотности плазмы на высотах 130 – 170 км; это может рассматриваться как образование дефокусирующей линзы на этих высотах [17]. Последнее вызывает значительное (до 20 дБ) ослабление плотности потока энергии ВН в верхней ионосфере. Совместное влияние большого поглощения мощной радиоволны в нижней ионосфере и дефокусирующей линзы приводит к тому, что в дневные часы ИИТ в верхней ионосфере имеет невысокую

интенсивность, поскольку не все формирующие её процессы могут развиваться достаточно эффективно. В частности, не наблюдается, как правило, развития F_{spread} на ионограммах, либо он имеет существенно более низкую интенсивность, чем в вечерних или ночных условиях модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением. Также в дневных условиях интенсивность мелкомасштабных ИИН оказывается значительно более слабой, чем в вечерней ионосфере [18].

В качестве одного из проявлений нагрева плазмы нижней ионосферы укажем также обнаруженное недавно явление уменьшения интенсивности микроволнового излучения в линии озона на высотах $\sim 50 - 60$ км [19,20], которое связывается с влиянием на атмосферу внутренних гравитационных волн, генерирующихся при периодическом нагреве ионосферной плазмы [21-23].

В условиях вечерней и особенно ночной ионосферы, когда ее D и E слои уже не оказывают сильного влияния на распространение мощной радиоволны и не происходит образования дефокусирующей линзы, вблизи высоты отражения ВН наблюдается развитие ИИТ высокой интенсивности. При этом спектр генерируемых неоднородностей захватывает диапазон масштабов от долей метра до десятков километров. Было также установлено, что ИИН генерируются не только в ограниченной по высоте ($\sim 10 - 30$ км) области вблизи высоты отражения ВН, но и далеко за её пределами. Так через несколько секунд после начала излучения ВН неоднородности с масштабами $0.1 - 1$ км обнаруживаются во всей области высот от высот ~ 100 км до высоты отражения ВН [24-26]. Помимо ИИН вблизи высоты ВН, где имеет место наиболее интенсивный разогрев плазмы, образуется полость с уменьшенной до 30% плотностью плазмы [13,27-29], которая действует как фокусирующая линза. В частности, совместное действие этой линзы и ИИН километровых масштабов в определённых условиях может обеспечить проникновение мощной радиоволны в закритическую плазму и влиять на состояние внешней ионосферы [30].

В последние годы был рассмотрен теоретически и исследован экспериментально эффект магнитного зенита [12-14,28,31,32], когда наиболее интенсивное развитие ИИН происходит при распространении мощной радиоволны O -поляризации вдоль силовых линий геомагнитного поля в области её взаимодействия с плазмой. Были также выполнены исследования гирогармонических свойств генерации ИИН [33,34]. Объяснение особенностей спектра рассеянных сигналов, когда частота ВН немного выше частоты гирогармоники, привели в [35] к выводу, что в этих условиях происходит генерация интенсивных неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 10 - 20$ см, обнаружение которых экспериментально является наиболее значимой задачей сегодняшнего дня. В [34] приведены результаты зондирования ВО ионосферы сигналами GPS, которые демонстрируют первые наши попытки обнаружить такие неоднородности.

В 2005 – 2010 гг. с помощью уникальной бортовой аппаратуры французского микро-спутника DEMETER были выполнены исследования свойств искусственной плазменной турбулентности на высотах ~ 700 км. В частности, была обнаружена генерация дактов с увеличенной на 15 – 80% плотностью плазмы и размерами 70 – 110 км поперёк геомагнитного поля при модификации F_2 -области ионосферы мощными радиоволнами O -поляризации [36-38]. Эти дакты способны влиять на распространение ОНЧ-волн [39], а при определённых условиях — стимулировать высыпание энергичных электронов из радиационных поясов Земли за счёт возбуждения магнитосферного мазера [40].

В заключение заметим, что периодическое воздействие мощными КВ радиоволнами на ионосферу Земли вызывает генерацию перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), пространственные масштабы которых составляют сотни километров. В экспериментах на стенде СУРА их диагностика осуществляется с помощью доплеровского радара вертикального зондирования ионосферы, расположенного около г. Харькова (Украина). Детальное описание радара, методов обработки принимаемых сигналов и полученных

результатов представлено в [21-33]. Выполненные измерения показали, что, спустя 40 – 50 мин после начала модификации ионосферы, над г. Харьковом начинают наблюдаться периодические изменения высоты отражённого от ионосферы зондирующего сигнала. Характеристики этих вариаций отвечают распространению внутренних гравитационных волн на ионосферных высотах. Установлено, что наиболее эффективно возбуждаются волны с периодами 15 – 30 мин.

Подводя итоги выполненным исследованиям, можно заключить, что при модификации F_2 -области ионосферы мощными КВ радиоволнами O -поляризации генерация ИИН различных масштабов наблюдается от высот её E -области до высот внешней ионосферы. В горизонтальном направлении искусственные неоднородности плотности плазмы регистрируются на расстояниях до 250 км от станда, что намного превышает размер области (~ 100 км), засвеченной пучком мощных радиоволн. Крупномасштабные ионосферные возмущения, связанные с генерацией внутренних гравитационных волн, регистрируются на расстояниях до 1000 км от станда СУРА (на самом деле, они должны регистрироваться и на больших дальностях). Одним из важных следствий выполненных в последние годы исследований явилось получение экспериментальных фактов, доказывающих, что модификация ионизированной компоненты атмосферы приводит к возмущению и её нейтральной компоненты.

Литература

1. Radio Sci. – 1974. – Vol. 9. – No. 11.
2. J. Atmos. Terr. Phys. – 1982. – Vol. 44. – No. 12.
3. J. Atmos. Terr. Phys. – 1985. – Vol. 47. – No. 12.
4. J. Atmos. Terr. Phys. – 1997. – Vol. 59. – No. 18.
5. Изв. вузов Радиофизика. – 1994. – Т. 37. – № 5.
6. Изв. вузов Радиофизика. – 1999. – Т. 42. – № 7,8.
7. Изв. вузов Радиофизика. – 2005. – Т. 48. – № 9.
8. Изв. вузов Радиофизика. – 2008. – Т. 51. № 11.
9. Изв. вузов Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 1-2.
10. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н., Митяков Н.А., Фролов В.Л. Искусственная ионосферная турбулентность (обзор). // Изв. вузов Радиофизика. – 1987. – Т. 30. – № 2. – С. 208-225.
11. Stubbe P. and Hagfors T. The Earth's ionosphere: A wall-less plasma laboratory. // Surveys in Geophysics. – 1997. – Vol. 18. – P. 57.
12. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. // УФН. – 2007. – Т. 177 – № 11. – С. 1145-1177.
13. Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Комраков Г.П., Котик Д.С., Митяков Н.А., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Сергеев Е.Н., Терещенко Е.Д., Толмачева А.В., Урядов В.П., Худукон Б.З. Модификация ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением. // УФН. – 2007. – Т. 17. – № 3. – С. 330-340.

14. *Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н., Котик Д.С., Токарев Ю.В.* Стенд “СУ-РА”: исследования атмосферы и космического пространства (обзор). // Изв. вузов Радиофизика. – 2007. – Т. 50. – № 7. – С. 545-576.
15. *Гуревич А.В., Шварцбург А.Б.* Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. // Изд. “Наука”. Москва. – 1973.
16. *Гинзбург В.Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. // Изд. “Наука”. Москва. – 1967.
17. *Бойко Г.Н., Васьков В.В., Голян С.Ф. и др.* Исследование дефокусировки радиоволн в ионосфере при воздействии мощного радиоизлучения. // Изв. вузов Радиофизика. – 1985. – Т. 28. – Вып. 8. – С. 960-971.
18. *Fialer P.A.* Field-aligned scattering from a heated region of the ionosphere — Observations at HF and VHF. // Radio Sci. – 1974. – Vol. 9. – No. 11. – P. 923-940.
19. *Куликов Ю.Ю., Григорьев Г.И., Красильников А.А., Фролов В.Л.* Вариации микроволнового излучения мезосферы при нагреве ионосферы мощными короткими радиоволнами. // Изв. вузов Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 1-2. – С. 57-65.
20. *Куликов Ю.Ю., Фролов В.Л., Григорьев Г.И., Демкин В.М., Комраков Г.П., Красильников А.А., Рыскин В.Г.* Воздействие мощным КВ радиоизлучением на интенсивность микроволнового излучения озона средней атмосферы. // Геом. и Аэрон. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 102-109.
21. *Черногор Л.Ф., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Пушкин В.Ф.* Вариации спектра ионосферных волновых возмущений при периодическом нагреве плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением. // Изв. вузов Радиофизика. – 2011. – Т.54. – № 2. – С.81.
22. *Черногор Л.Ф., Фролов В.Л.* Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением. // Изв. вузов Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 1-2. – С. 14-36.
23. *Черногор Л.Ф., Фролов В.Л., Пушкин В.Ф.* Колебания инфразвукового диапазона в ионосфере при воздействии на нее мощным радиоизлучением. // Изв. вузов Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 5. – С. 327-340.
24. *Фролов В.Л., Беликович В.В., Бахметьева Н.В., Ушаков А.А.* Генерация искусственных ионосферных неоднородностей на высотах 130 – 170 км. // XXII Всероссийская конференция по распространению радиоволн. Ростов-на-Дону. – 2008. – Труды конференции. – Т. 2. – С. 134-137.
25. *Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Вяхирев В.В., Фролов В.Л., Калинина Е.Е.* Обратное рассеяние радиоволн искусственными неоднородностями ионосферной плазмы на высотах 120 – 180 км. // Известия вузов Радиофизика. – 2010. – Т. 53. – № 5-6. – С. 338-355.
26. *Бахметьева Н.В., Фролов В.Л., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Болотин И.А., Акчурич А.Д., Зыков Е.Ю.* О формировании искусственных плазменных возмущений в нижней ионосфере. // Изв. вузов Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 1-2. – С. 106-121.

27. *Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Gurevich A.V., Zybin K.P., Frolov V.L., Myasnikov E.N., Muravieva N.V., Carlson H.C.* Radio tomography and scintillation studies of ionospheric electron density modification caused by a powerful HF-wave and magnetic zenith effect at mid-latitudes. // *Physics Letters A*, 325. – 2004. – P. 381-388.
28. *Терещенко Е.Д., Милличенко А.Н., Фролов В.Л., Юрик Р.Ю.* Наблюдение эффекта магнитного зенита с использованием сигналов спутников GPS/GLONASS. // *Изв. вузов Радиофизика*. – 2008. – Т. 51. – № 11. – С. 934-938.
29. *Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Frolov V.L., Komrakov G.P., Nazarenko M.O., Padokhin A.M.* Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigation satellite radio transmissions. // *Radio Sci.* – 2012. – Vol. 47. – RS0L15, doi:10.1029/2011RS004957.
30. *Фролов В.Л., Мутяков Н.А., Шорохова Е.А., Парро М.* Структура электрического поля мощной КВ радиоволны во внешней ионосфере Земли. // *Изв. вузов Радиофизика*. – 2013 (направлена в печать).
31. *Фролов В.Л., Комраков Г.П., Куницын В.Е., Падохин А.М., Васильев А.В., Курбатов Г.А.* Зондирование возмущенной излучением нагревного стенда Сура ионосферы сигналами навигационных ИСЗ системы GPS. // *Известия вузов Радиофизика*. – 2010. – Т. 53. – № 7. – С. 421-443.
32. *Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Мясников Е.Н., Рахлин А.В., Фролов В.Л.* Исследование эффекта магнитного зенита по результатам наблюдений за искусственной ионосферной турбулентностью. // XXII Всероссийская конференция по распространению радиоволн. Ростов-на-Дону. – 2008. – Труды конференции. – Т. 2. – С. 179–181.
33. *Фролов В.Л., Недзвецкий Д.И., Урядов В.П., Иванов В.А., Иванов Д.В., Лащевский А.Р., Рябова Н.В.* Гирогармонические свойства среднemasштабной искусственной ионосферной турбулентности, проявляющиеся при нагреве F₂-области ионосферы мощной радиоволной О-поляризации. // *Изв. вузов Радиофизика*. – 2008. – Т.51. – № 5. – С. 367-375.
34. *Фролов В.Л., Болотин И.А., Комраков Г.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Вертоградова Е.Г., Акчурин А.Д., Бочкарев В.В., Дрешер А.М., Зыков Е.Ю., Латышов Р.Р., Петрова И.Р., Юсупов К.М., Куницын В.Е., Падохин А.М., Курбатов Г.А.* Гирогармонические свойства генерации искусственных ионосферных неоднородностей. // *Изв. вузов Радиофизика*. – 2012. – Т. 55. – № 6. – С. 393-420.
35. *Gurevich A.V., Zybin K.P.* // *Phys. Lett. A* 358. – 2006. P. 159-165.
36. *Рапопорт В.О., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Марков Г.А., Белов А.С., Парро М., Раух Дж.Л.* Некоторые результаты измерения характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере мощным КВ радиоизлучением стенда Сура. // *Изв. вузов Радиофизика*. – 2007. – Т. 50. – № 8. – С.709–721.
37. *Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П., Белов А.С., Марков Г.А., Парро М., Рош Ж.Л., Мишин Е.В.* Создание дактов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением. // *Письма в ЖЭТФ*. – 2008. – Т. 88. – Вып. 12. – С. 908-913.

38. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П., Белов А.С., Марков Г.А., Парро М., Рош Ж.Л., Мишин Е.В. Спутниковые измерения характеристик плазменных возмущений, создаваемых при нагреве ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением стенда Сура. // Изв. вузов Радиофизика. – 2008. – Т. 51. – № 11. – С. 915-934.
39. Rapoport V.O., Frolov V.L., Polyakov S.V., Komrakov G.P., Ryzhov N.A., Markov G.A., Belov A.S., Parrot M., and Rauch J.-L. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility. // J. Geophys. Res. – 2010. – Vol. 115. – A10322, doi:10.1029/2010JA015484.
40. Марков Г.А., Белов А.С., Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Парро М., Рош Ж.-Л. Возбуждение магнитосферного мазера воздействием на ионосферу Земли мощным КВ радиоизлучением наземного передатчика. // ЖЭТФ. – 2010. – Т. 138. – Вып. 6(12). – С. 1037-1042.

The results of experimental studies of the spatial structure of the disturbed region of the ionosphere

Frolov V.L.

Radio Physical Research Institute, Russia

The paper considers some features of ionospheric artificial turbulence (IAT) generation at mid-latitudes in the conditions of day and night ionosphere. It was shown that IAT low intensity during daytime is determined by powerful radio wave absorption in the lower ionosphere, ionosphere F2 layer low height and defocusing lens formation at the heights of 130-150 km. In nighttime conditions of the ionosphere, near the level of pump wave (PW) reflection, generation of intensive ionospheric artificial inhomogeneities of different scales (from parts of a meter to tens of kilometers in the cross direction of geomagnetic field), effecting HF-UHF-DF radio wave propagation, is observed. Appearance of artificial inhomogeneities with the scales of tens-hundreds of meters is registered from E-layer heights to the height of the outer ionosphere. At the heights of 250-400 km, focusing lens generation is observed; and at the heights of the outer ionosphere, ducts with increased plasma density are registered. Gyroharmonic properties of different scale inhomogeneity generation and the possibility of super small-scale (decameter) inhomogeneity generation in the conditions, when PW frequency is slightly above electron gyroharmonic frequency, are discussed. Experimental results, concerning moving ionospheric disturbance generation during periodical effect of a powerful radio wave on ionospheric plasma, are presented. On the basis of the obtained experimental data the conclusion is given, that the ionospheric region, where artificial ionospheric inhomogeneities of different nature are registered, considerably exceeds the size of the ionosphere, illuminated by powerful radio wave beam.