

**Результаты последних исследований по модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА. Современные проблемы в изучении свойств искусственной ионосферной турбулентности**

В.Л. Фролов<sup>1,2</sup>, И.А. Болотин<sup>1</sup>, Р.Ю. Лукьянова<sup>3</sup>, А.О. Рябов<sup>1</sup>, Р.О. Шерстюков<sup>2</sup>, Е.А. Шорохова<sup>4</sup>

<sup>1)</sup> НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Б. Печерская 25/12а [frolov@nirfi.unn.ru](mailto:frolov@nirfi.unn.ru)

<sup>2)</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18.

<sup>3)</sup> ГЦ РАН, 119296, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3.

<sup>4)</sup> Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова, 603137, г. Нижний Новгород ул. Тропинина 47.

*В докладе приводятся результаты исследований особенностей генерации искусственной ионосферной турбулентности, полученные в последние годы на стенде СУРА. Они касаются генерации сверхмелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, формирования плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы, стимуляции высыпания энергичных электронов из радиационных поясов Земли, генерации ПИВ/ВГВ при периодическом нагреве ионосферной плазмы, свойств искусственной ионосферной турбулентности при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации, эффекта края диаграммы излучения пучка мощных радиоволн.*

*In the report it is presented the results of investigation of peculiarities of artificial ionospheric turbulence generation, which were recently obtained in experiments at the SURA facility. They are related to the generation of supra-small-scale irregularities, forming of plasma perturbations in the outer ionosphere, HF-induced precipitation of energetic electrons from the Earth's radiation belts, AGW generation by ionosphere periodical pumping, ionosphere modification by X-mode powerful radio waves, and the effect of an antenna pattern edge.*

### **1. Генерация сверхмелкомасштабных неоднородностей**

Ещё в 1995 г. в экспериментах на стенде СУРА (НИРФИ, Нижний Новгород) было обнаружено явление уширения спектра сигналов ракурсного рассеяния КВ радиоволн на декаметровых искусственных неоднородностях плотности плазмы, возбуждаемых за счёт развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости при модификации  $F_2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами  $O$ -поляризации [1]. Уширение спектра наблюдалось, когда частота волны накачки (ВН) была равна или немного выше гармоники гирочастоты электронов. Интерпретация этого явления была дана в работе [2], в которой было показано, что его природа связана с генерацией сверхмелкомасштабных искусственных неоднородностей плотности плазмы (СМИН) внутри декаметровых неоднородностей.

Для обнаружения СМИН использовался метод зондирования возмущённой области ионосферы сигналами спутников GPS [3,4]. При этом определялась величина вариаций полного электронного содержания (ПЭС) на линии распространения сигнала от спутника до приёмника, и, соответственно, выполнялось измерение вариаций концентрации ионосферной плазмы. В этих экспериментах нагрев ионосферы, как правило, осуществлялся в режиме излучения ВН [10 с – излучение, 10 с – пауза]. При этом, как было показано в [3,4], появление быстрых флуктуаций ПЭС с периодом излучения ВН может свидетельствовать о генерации СМИН.

Результаты измерений дают основание утверждать, что в области «магнитного зенита» для ВН наблюдаются наибольшее уширение спектра рассеянного сигнала и

наиболее сильные вариации ПЭС (величиной до 0.02 – 0.03 TECU), которые отвечают генерации СМИН с  $\Delta N/N \approx 2 - 3\%$ . Поскольку пороговая мощность появления уширения спектра рассеянных сигналов и генерации *BUM-2* составляет  $\sim 5$  МВт, можно полагать, что и пороговая мощность генерации СМИН имеет те же значения  $P_{эфф}$ .

## **2. Генерация плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы**

При проведении в 2005 – 2010 гг. экспериментов в рамках программы СУРА-DEMETER [5] в условиях ночной ионосферы было обнаружено формирование дактов с увеличенной на 10 – 40% плотностью плазмы на высотах 660 км с поперечными к геомагнитному полю размерами  $\sim 100$  км, которые были заполнены неоднородностями с поперечными к геомагнитному полю размерами  $l_{\perp}$  от 10 м до 10 – 15 км. Такие дакты обеспечивают каналирование радиоволн СДВ диапазона на высоты верхней ионосферы и магнитосферы. Выполненные эксперименты позволили также обнаружить факт высыпания энергичных электронов с энергиями  $\sim 100$  кэВ из радиационных поясов Земли при модификации  $F_2$ -слоя ионосферы; вдоль орбиты ИСЗ высыпание наблюдалось не только в пределах дакта плотности плазмы, но и в широкой области пространства до 300 км на юг до 800 км на север от положения стенда СУРА.

В 2016 – 2017 гг. проводились измерения вариаций плотности и температуры плазмы на высотах  $\sim 500$  км с помощью группировки ИСЗ SWARM. В этих экспериментах в условиях ночной ионосферы наблюдалось появление вариаций плотности и температуры плазмы с масштабами  $l_{\perp} \approx 15$  км, увеличение в среднем температуры электронов в возмущённой магнитной силовой трубке, но не было обнаружено генерации дактов плотности плазмы на этих высотах [6]. Также было установлено, что на высотах 450 – 500 км вариации плотности и температуры плазмы обнаруживаются на расстояниях до 200 км вдоль орбиты ИСЗ (приблизительно в северо-южном направлении), что в 1.5 – 3 раза превышает горизонтальные размеры центральной части ВО ионосферы на уровне отражения ВН, где наблюдается развитие наиболее интенсивной ИИТ и наиболее сильный разогрев плазмы. Как показали выполненные эксперименты, должны выполняться одни и те же условия для формирования дактов на высотах  $\sim 660$  км и плазменных возмущений на высотах  $\sim 500$  км, что может указывать на существующую общность механизмов их образования.

На основании полученных результатов можно заключить, что на высотах  $\sim 500$  км наиболее интенсивными являются неоднородности плотности плазмы с размерами  $l \approx 15$  км в ортогональном к геомагнитному полю направлении и с относительной их амплитудой  $\delta N \approx 3\%$ . Неоднородности почти таких же размеров обнаруживаются и внутри возмущённой области ионосферы вблизи максимума её  $F_2$ -слоя особенно в области «магнитного зенита» для ВН, где значение вариаций плотности плазмы в них может достигать 25%, а также внутри дактов, где они имеют амплитуду  $\delta N$  до 10%. Таким образом, генерация крупномасштабных ИИН с  $l \approx 15$  км обнаруживается в широком интервале высот от высоты отражения ВН до высот внешней ионосферы ( $\sim 660$  км), причём они имеют наименьшую относительную интенсивность именно в промежуточной области на высотах  $\sim 500$  км. Ясно, что учёт только термодиффузионных процессов не может объяснить такое их распределение по высоте.

## **3. Генерация ПИВ/ВГВ при периодическом нагреве $F_2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами**

В последние годы на стенде СУРА были выполнены многочисленные эксперименты по изучению свойств волновых возмущений (ВВ), генерация которых на

ионосферных высотах наблюдается при периодическом нагреве ионосферы мощными КВ радиоволнами. Регистрация ВВ осуществлялась: а) около г. Харькова (Украина) с помощью доплеровского радара вертикального зондирования на загородной лаборатории Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина [7] и с помощью радара некогерентного рассеяния Института ионосферы [8] (расстояние от стенда СУРА до диагностических средств составляет  $\sim 960$  км); б) с помощью метода радиотомографии [9] и в) с помощью построения двумерных карт вариаций полного электронного содержания (ПЭС) [10]. Измерения выполнялись, как правило, в спокойных геомагнитных условиях при низком уровне естественных возмущений в ионосфере.

Основываясь на результатах этих исследований, можно сделать следующие выводы:

1) Периодический нагрев верхней ионосферы мощным радиоизлучением практически во все сезоны в любое время суток приводил на высотах 100 – 500 км к генерации или усилению ВВ, имеющих период, равный длительности цикла нагрев / пауза. Было установлено, что наиболее эффективным режимом излучения стенда для их генерации был режим, в котором для модификации ионосферы использовались радиоволны *O*-поляризации, которые излучались в направлении «магнитного зенита» для ВН с эффективной мощностью  $PG \geq 50$  МВт и достаточно длинными интервалами нагрева и паузы (15 – 30 мин каждый, на частотах ниже частоты Брента – Вяйсяля). Эффективность генерации ВВ увеличивалась при приближении частоты ВН к  $f_{OF2}$ . Воздействие мощными радиоволнами *O*-поляризации на нижнюю ионосферу или нагрев ионосферы волнами *X*-поляризации как и нагрев волнами обеих поляризаций «на просвет» не приводили к их генерации.

2) Скорость распространения ВВ с периодами 20 – 60 мин обычно составляла 300 – 500 м/с на высотах  $h \approx 120 – 200$  км, возрастая с ростом высоты.

3) Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов  $N_e$  в поле ВВ составляла над г. Харьковом около 1 – 10%, где меньшие значения отвечают ночным часам наблюдений и более низким высотам.

4) Параметры ВВ (в первую очередь их скорость) существенно зависели от близости периода волн к периодам колебаний атмосферы на собственных частотах (периодам акустической отсечки и Брента – Вяйсяля).

5) По своим характеристикам ВВ с периодами 10 – 30 мин отвечают ВГВ.

Важным шагом в развитии этих исследований стало использование метода построения двумерных карт вариаций ПЭС, которые позволяют отслеживать характер распространения искусственных ВВ на больших (до 800 км) расстояниях от стенда СУРА. Полученные здесь результаты ясно демонстрируют, что вызванные работой стенда СУРА вариации ПЭС наблюдаются в широкой области пространства над стендом СУРА, распространяясь на юг, по крайней мере, до  $50^\circ$  сш. (или на  $\sim 800$  км). При этом они появляются там уже спустя несколько минут после начала воздействия. Это позволяет оценить скорость распространения возбуждающего их агента как не меньше  $3 \cdot 10^3$  м/с, что почти на порядок превышает скорость распространения внутренних гравитационных волн на ионосферных высотах. Можно также с уверенностью заключить, что присутствие естественных ПИВ с длиной волны 150 – 200 км стимулирует образование искусственных вариаций ПЭС.

Как показали измерения, вариации ПЭС, вызванные модификацией  $F_2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами, могут достигать значений 0.3 – 0.5 TECU. Считая продольные размеры возмущений вдоль луча на ИСЗ равными 200 – 400 км, значение интеграла изменения плотности плазмы должно составлять  $\Delta N \approx (1 – 2) \cdot 10^{10}$  эл/м<sup>3</sup>. Отнеся это значение к значению плотности плазмы в максимуме  $F_2$ -слоя с

критической частотой  $\sim 5$  МГц, получим  $\Delta N / N \approx (3 - 6)\%$ , что близко к максимальным значениям вызванных работой стенда СУРА вариаций плотности плазмы, регистрируемых во внутренних гравитационных волнах над г. Харьковом [7,8].

Выполненные исследования позволяют сделать следующий важный вывод. Поскольку ВГВ по своей природе есть возмущения нейтральной составляющей атмосферы, с необходимостью следует заключить, что при модификации ионосферы мощной КВ радиоволной, помимо нагрева электронной компоненты плазмы и генерации плазменных возмущений различной природы, имеет место и заметное возмущение нейтральной компоненты атмосферы.

#### 4. Нагрев ионосферы мощным КВ радиоизлучением X-поляризации

Результаты нагрева среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами, излучаемые нагревным стендом СУРА, представлены в работах [11,12]. Подводя итоги выполненным исследованиям, можно констатировать:

- В наших экспериментах, в отличие от аналогичных экспериментов в авроральной ионосфере на стенде EISCAT-heating [13], не наблюдалась генерация декаметровых ИИН масштабами  $l_{\perp} \approx 10 - 20$  м.

- Генерация неоднородностей с  $l_{\perp} = 50 - 200$  м имела место при модификации ионосферы в вечерних и ночных условиях. При этом их интенсивность только на 4 – 6 дБ была меньше, чем в случае модификации ионосферы мощными радиоволнами O-поляризации. В утренних и дневных условиях проведения измерений отсутствие генерации этих неоднородностей связывается с большим регулярным поглощением в нижних слоях ионосферы и с формированием дефокусирующей линзы на высотах 130 – 150 км.

- В вечерних и ночных условиях имела место генерация ИИН с  $l_{\perp} = 0.3 - 3$  км, проявляющаяся как развитие достаточно интенсивного  $F_{\text{spread}}$  на ионограммах вертикального зондирования. При этом в оптимальных условиях проведения измерений интенсивность  $F_{\text{spread}}$ , а следовательно и интенсивность неоднородностей, уступала его интенсивности при модификации ионосферы волнами O-поляризации, но не более, чем в несколько раз (уменьшение интенсивности неоднородностей до 10 дБ). В утренние часы даже при мощностях волны накачки  $\sim 100$  МВт  $F_{\text{spread}}$  либо не развивался, либо он имел низкую интенсивность. В дневных условиях появление  $F_{\text{spread}}$  на ионограммах было достаточно редким явлением, его интенсивность при этом имела низкий уровень. Также отмечается, что в условиях вечерней и ночной ионосферы пороговая мощность генерации ИИН с  $l_{\perp} = 0.3 - 3$  км не превышала 20 – 30 МВт.

- Генерация ИИН с  $l_{\perp} = 5 - 10$  км и более крупномасштабных неоднородностей на высотах вблизи максимума  $F_2$ -слоя ионосферы имела место только в условиях вечерней и ночной ионосферы. При этом их интенсивность была на порядок меньше их интенсивности при модификации ионосферы волнами O-поляризации.

- Во всём диапазоне исследуемых масштабов генерация ИИН наблюдалась только в условиях отражения мощных радиоволн X-поляризации.

Таким образом, можно предполагать, что в среднеширотной ионосфере декаметровые неоднородности возбуждаются только при модификации ионосферы мощными радиоволнами O-поляризации, и это происходит за счёт развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости. Развитие более крупномасштабных неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 0.3 - 1$  км при модификации ионосферы мощными радиоволнами X-поляризации, следует, по-видимому, связывать с развитием самофокусирующей неустойчивости пучка мощных радиоволн. Механизм генерации более мелкомасштабных ИИН с  $l_{\perp} \approx 50 - 200$  м, скорее всего, связан с нелинейной перекачкой энергии плазменной турбулентности по её спектру от более крупных

масштабов к более мелким. ИИН с размерами от нескольких километров до десятка и более километров, по-видимому, являются результатом усиления естественных неоднородностей при нагреве ионосферной плазмы на высотах  $F_2$ -области. В силу всего вышесказанного, спектр ИИН при  $X$ -модификации ионосферы обрывается для неоднородностей с  $l_{\perp} < 50$  м, его спектральная интенсивность в несколько раз слабее по сравнению со случаем  $O$ -нагрева в области масштабов 50 м – 3 км и имеет заметно более слабую (по сравнению со случаем  $O$ -нагрева) спектральную интенсивность в области масштабов  $l_{\perp} \geq 5$  км.

При модификации дневной ионосферы мощными радиоволнами обеих поляризаций на высотах 130 – 150 км в результате нагрева плазмы и нарушении из-за этого ионизационно-рекомбинационного баланса образуется область с увеличенной на 10 – 20% концентрацией плазмы, которая играет роль дефокусирующей линзы.

При выполнении исследований был обнаружен эффект «края диаграммы направленности» излучения пучка мощных радиоволн, когда при нагреве ионосферы мощными радиоволнами обеих поляризаций наиболее интенсивные неоднородности километровых масштабов регистрировались на краю диаграммы направленности в области  $\sim 0.1 P_{\max}$ . Эту особенность естественно связывать с наиболее быстрым изменением интенсивности электрического поля мощной радиоволны в поперечном к оси пучка направлении и, следовательно, с неоднородным нагревом плазмы в этом направлении, что может привести к генерации крупномасштабных ИИН на границе пучка мощных радиоволн, причём более интенсивной как раз для волн  $X$ -поляризации [14]. Было получено, что возбуждаемые неоднородности километровых масштабов вызывают вариации ПЭС от 0.02 до 0.05 TECU (редко до 0.1 TECU). При продольном масштабе таких неоднородностей  $\sim 30$  км оценка вариаций плотности плазмы в них составляет  $\delta N \approx 2 - 5\%$ . Следует ожидать, что отмеченный выше краевой эффект генерации ИИН километровых масштабов может проявляться при исследовании и других свойств искусственной ионосферной турбулентности.

В работе рассматриваются современные проблемы в изучении свойств искусственной ионосферной турбулентности.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект № 3.1844.2017/ПЧ). Работа Болотина И.А. и Лукьяновой Р.Ю. выполнялась при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00475. Работа Фролова В.Л. и Шерстюкова Р.О. в части построения двумерных карт вариаций ПЭС была выполнена за счёт средств субсидии государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.*

### **Литература**

1. Ponomarenko P.V., Leyser T.B., Thide B. // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104, No. A5. P. 10,081.
2. Gurevich A.V. and Zybin K.P. // Phys. Lett. A, (2006), 358. P. 159.
3. Milikh G.M., Gurevich A.V., Zybin K.P., and Secan J. // Geophys. Res. Lett. 2008. Vol. 35, L22102, doi:10.1029/2008GL035527.
4. Фролов В.Л., Болотин И.А. Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. // Изв. вузов. Радиофизика, 2017. Т. 60, № 6, с. 502-508.
5. В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Е.А. Шорохова, и др. // Изв. Вузов. Радиофизика, 2016. Т. 59, № 3, с. 198-222.
6. В.Л. Фролов, А.С. Белов, И.А. Болотин и др. // Изв. Вузов. Радиофизика, 2018 (направлена в печать).
7. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. // Изв. вузов. Радиофизика, 2013. Т. 56, № 5. С. 307-321.

8. Черногор Л.Ф., Панасенко С.В., Фролов В.Л., Домнин И.Ф. // Изв. вузов. Радиофизика, 2015. Т. 53, № 2. С. 85-99.
9. Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Frolov V.L., et al. // Radio Sci., 2012. Vol. 47, RS0L15, doi:10.1029/2011RS004957.
10. Шерстюков Р.О., Фролов В.Л., Акчурин А.Д. // Изв. вузов. Физика, 2016. Т. 59, № 12-3, с. 23-27.
11. Фролов В.Л. // Изв. вузов. Радиофизика, 2012. Т. 55, № 1-2, с. 122-139.
12. В.Л. Фролов, И.А. Болотин, Г.П. Комраков и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 2014. Т. 57, № 6, с. 437-463.
13. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K., et al. // J. Atm. Solar-Terr. Phys., 2015. Vol. 135. P. 50-63.
14. Kuo S., Cheng W-T., Snyder A., et al. // Geophys. Res. Lett., 2010. Vol. 37, L01101. DOI: 10.1029/2009GL041471.