

## СВОДНЫЕ ИТОГИ ПО ПРОГРАММЕ СУРА-SWARM, ПРОВЕДЁННОЙ В 2016–2022 ГОДАХ

А.О. Рябов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия,  
RyabovAIOI@yandex.ru

## SUMMARY RESULTS OF THE SURA-SWARM PROGRAM CONDUCTED IN 2016–2022

A.O. Ryabov

N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia,  
RyabovAIOI@yandex.ru

**Аннотация.** В 2016–2022 гг. было проведено около 150 сеансов по программе СУРА-SWARM. Данные исследования касались изучения возбуждения турбулентности ионосферы при воздействии на неё мощным коротковолновым радиоизлучением стенда СУРА и позволили определить характерные значения данных возмущений и условия их возникновения.

**Ключевые слова:** ионосфера, искусственные ионосферные неоднородности.

**Abstract.** In 2016–2022, about 150 sessions were conducted under the SURA-SWARM program. These studies concerned the study of the turbulence excitation in the ionosphere when exposed to powerful short-wave radio emission from the SURA stand and made it possible to determine the characteristic values of these disturbances and the conditions for their occurrence.

**Keywords:** ionosphere, artificial ionospheric irregularities.

### ВВЕДЕНИЕ

Натурные эксперименты являются одним из актуальных способов изучения плазменных явлений в ионосфере [Фролов, 2017; Рябов, 2018]. Существует много способов исследования верхней ионосферы Земли: метод вертикального зондирования сигналами ионосферных станций, метод пробных волн, ракурсное рассеяние радиоволн короткого и ультракороткого диапазонов, зондирование возмущённой области (ВО) ионосферы сигналами искусственных спутников Земли (ИСЗ) и другие. Ещё одним эффективным методом исследования является использование ИСЗ, предназначенных для научных целей [Рябов, 2017; Рябов, 2019]. Наиболее интересны эксперименты, в рамках которых проводится стимуляция ионосферы радиокомплексами, расположенными на Земле. Главными инструментами для исследования данных явлений представляются значения плотности  $N_c$  и температуры электронов  $T_e$ . Наиболее продуктивным случаем использования бортовой аппаратуры для изучения особенностей верхней ионосферы является серия кампаний СУРА-DEMETER, проведённых в 2005–2010 гг. [Фролов и др., 2019; Фролов и др., 2020].

### УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Группировка спутников серии SWARM, состоящая из трёх идентичных аппаратов, была выведена на орбиту 22 ноября 2013 года. Спутники имеют низкие круговые орбиты, лежащие в меридиональной плоскости. При этом два спутника (А и С) летают на высоте около 450 км параллельно друг другу на расстоянии до 500 км. Третий спутник (В) летает в другой меридиональной плоскости на высоте 500 км. Используемый в наших экспериментах по модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами нагревный стенд «Сура» расположен вблизи р/п Васильсурск в 120 км к востоку от

г. Нижнего Новгорода (координаты стенда: 56,15° с. ш., 46,1° в. д.). Эффективная мощность излучения стенда в режиме синхронного излучения всех трёх его модулей с максимальной мощностью составляет  $P_{\text{eff}} \approx 80$  МВт на частоте излучения  $f_0 \approx 4,3$  МГц, увеличиваясь с ростом  $f_0$  до  $P_{\text{eff}} \approx 180$  МВт для  $f_0 \approx 6,5$  МГц. В рассматриваемых ниже экспериментах стенд излучал мощные радиоволны с диаграммой направленности излучения волны накачки на 14° на юг, чтобы усилить генерацию искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта «магнитного зенита». В выполняемых на стенде «Сура» экспериментах излучение волны накачки начиналось, как правило, за 16 мин до пролёта спутника через возмущённую магнитную силовую трубку. Кроме того, важно отметить, что также проводились сеансы по обнаружению возмущения ионосферы в магнитосопрежённой области (МСО): для таких экспериментов нагрев должен был длиться примерно 40–45 мин.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЁННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

За годы кампаний было проведено около 150 сеансов по программе СУРА-SWARM. Большое количество проведённых сеансов позволило получить необходимый опыт по оптимизации проводимых экспериментов с целью достижения наилучших результатов. Таким образом, было определено, что плазма верхней ионосферы под воздействием коротковолнового возмущения становится заметно турбулизованной при выполнении следующих условий [Фролов и др., 2016].

1. Эксперименты должны проводиться в вечерние и ночные часы.

Причины, почему днём практически не наблюдается возбуждение неоднородностей плазмы в следующем:  $D$ - и  $E$ - слои ионосферы днём значительно больше, из-за чего меньше мощности доходит до высоты отражения; на высоте области  $F_1$ -слоя

возможно возникновение дефокусирующей линзы, что опять же приводит к уменьшению мощности; днём высота отражения волны накачки от  $F_2$ -слоя ниже — что приводит к увеличению доли нейтральных частиц, которые негативно влияют на вероятность возбуждения турбулентности.

2. Высота отражения волны накачки  $h$  должна быть выше 200 км.

Это условие объясняется, как уже было отмечено выше, негативной ролью нейтральных частиц. Напомним, что примерно каждые 8 километров вниз число нейтралов увеличивается в  $e$  раз.

3. Волна накачки должна быть  $O$ -поляризации.

Это связано с тем, что волны  $X$ -поляризации не участвуют в резонансном взаимодействии радиоволны с плазмой (в нашем случае волны накачки с плазмой), поскольку они отражаются от ионосферы ниже уровня плазменных резонансов. Их воздействие на ионосферу ограничивается омикским нагревом плазмы, развитием самофокусирующей неустойчивости и генерацией искусственных периодических неоднородностей (ИПН) в поле стоячей волны, образованной падающей на ионосферу и отражённой от нее волнами.

4. Частота волны накачки  $f_{ВН}$  должна быть меньше критической частоты  $F_2$ -слоя  $f_{0F2}$ .

Несмотря на очевидность этого пункта, стоит отметить, что были (хоть и редкие) случаи исключения. Это объясняется тем, что при некоторых условиях частота верхнегибридного резонанса  $f_{ВГР}$  остаётся меньше  $f_{0F2}$ , и при этом, хотя и на меньшем уровне, продолжается развитие тепловой

параметрической неустойчивости, особенно в условиях уже сильно развитой искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ).

5. Эффективная мощность волны накачки  $P_{эф} \geq 50$  МВт.

Особенно заметно важность этого условия проявилось в годы не самой эффективной работы стенда (2019–2020 гг. — до ремонта).

Ещё одним важным условием был относительно близкий пролёт спутника от центра возмущённой области (не далее 50 км). Но это условие правильно назвать лишь условием обнаружения искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), а не условием турбулизации ионосферы.

Здесь важно отметить, что условия турбулизации были идентичными и для северного, и для южного полушария. Единственной разницей стала большая требовательность по мощности для сеансов пролёта спутников над МСО.

Кроме того, необходимо уточнить, что под турбулизацией верхней ионосферы в этих экспериментах подразумевается наличие крупномасштабных ИИН, которые выражаются в заметном изменении концентрации и температуры электронов в возмущённой области и в увеличении вариаций этих характеристик. На первом рисунке ниже приведён характерный пример сеанса пролёта ИСЗ над стендом «Сура», на втором – сеанс пролёта над МСО.

Проведённые сеансы позволили сформулировать выводы, которые будут изложены ниже в заключении.

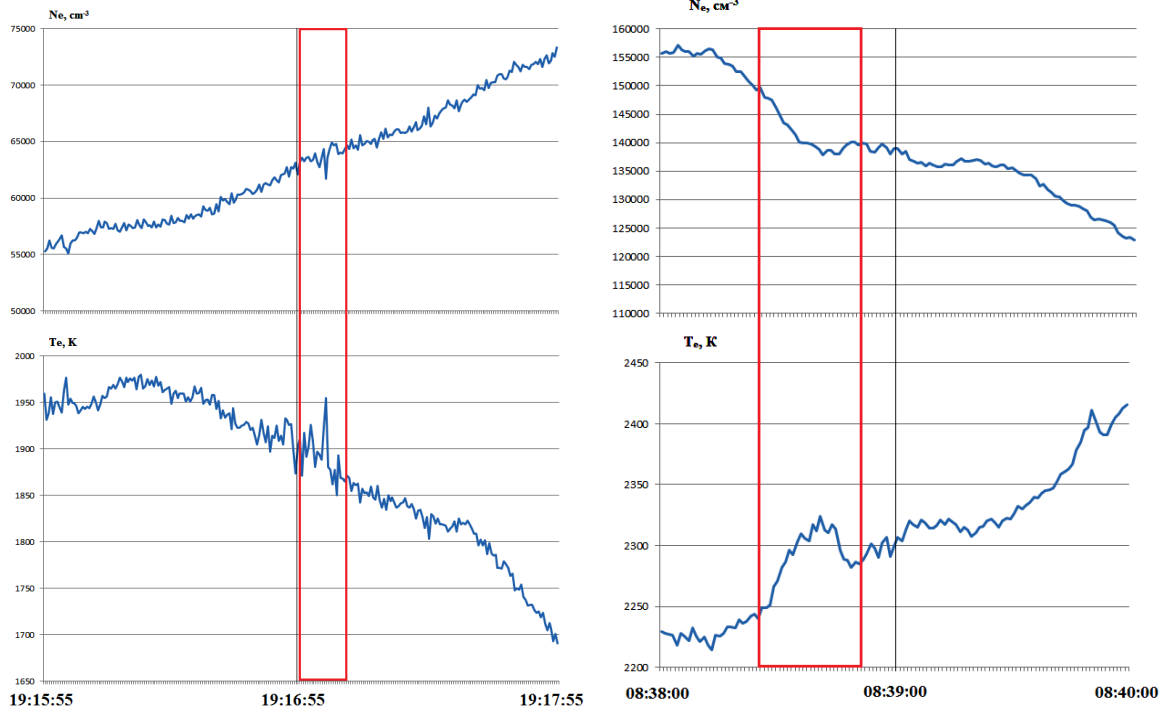


Рис. 1. Характерные сеансы возмущения верхней ионосферы под воздействием коротковолнового излучения стенда «Сура». Слева представлен сеанс пролёта в северном полушарии 25 апреля 2016 г., справа — пролёт спутника SWARM в южном полушарии 17 сентября 2018 г. Красным прямоугольником обозначены области, в которых наблюдаются ИИН. Вертикальными линиями обозначаются центры возмущённых областей

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На высотах ~ 500 км вариации плотности и температуры плазмы обнаруживаются на расстояниях до 200 км вдоль орбиты ИСЗ, что в 2–3 раза превышает как горизонтальные размеры центральной части ВО ионосферы на уровне отражения ВН, где наблюдается развитие наиболее интенсивной ИИТ и наиболее сильный разогрев плазмы, так и размеры дактов, генерируемых на высотах ~ 660 км. Отмечается, что, как и в случае развития ИИТ, на генерацию искусственных плазменных возмущений, регистрируемых на высотах ~ 500 км, сильное влияние производит эффект «магнитного зенита».

В области высот 450–500 км наблюдается средний рост температуры электронов на величину 3–10 % и сильные флуктуации её значений (2–8 %). Сравнивая результаты измерений, полученных с помощью SWARM и DEMETER, можно заключить, что величина вариаций  $T_e$  с ростом высоты уменьшается.

На высотах 450–500 км с точностью до 1 % не было обнаружено характерного для дактов увеличения плотности плазмы с размерами ~ 100 км поперёк линий геомагнитного поля, характерных для дактов, которые регистрировались на высотах ~ 660 км в экспериментах с ИСЗ DEMETER. При этом было установлено, что должны выполняться одни и те же условия для появления плазменных возмущений на высотах ~ 500 км и формирования дактов плотности плазмы на высотах ~ 660 км.

Работа выполнена по проекту № FSWR-2023-0038 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы / Монография. Нижний Новгород: Издательство ННГУ. 2017. 468 с.

Рябов А.О. Определение ионного состава внешней ионосферы на основе характеристик КНЧ-СНЧ-волн, регистрируемых во время работы стенда «СУРА» // Физика плазмы. 2018. Т. 44, № 11. С. 916–921.

Рябов А.О. Поляризационные характеристики КНЧ/СНЧ-волн, наблюдаемых во внешней ионосфере при воздействии мощным наземным КВ-радиоизлучением / Тезисы докладов XV Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике, 2017. С. 92.

Рябов А.О., Фролов В.Л. Связь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 10. С. 736–746.

Фролов В.Л., Акчурин А.Д., Болотин И.А. и др. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированные модификацией среднеширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 9. С. 641–663.

Фролов В.Л., Рябов А.О., Акчурин А.Д. Искусственные высыпания энергичных электронов в магнитосопреженной относительно стенда «Сура» области ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 4. С. 285–296.

Фролов В.Л. и др. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F2-области мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 3. С. 198–222.