

## **Обзор кампаний СУРА-SWARM, проведенных в 2016-22 годах**

А. О. Рябов<sup>1</sup>, В. Л. Фролов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603022, Россия, Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23

*В публикации приведён обзор проведённых в 2016-22 годах кампаний СУРА-SWARM, в рамках которых проводились исследования верхней ионосферы Земли. Данные исследования касались изучения возбуждения турбулентности ионосферы при воздействии на неё мощным коротковолновым радиоизлучением стенда СУРА. Определялись наиболее характерные значения данных возмущений, условий их возникновения и проводились сравнения данных искусственных модификаций с естественным состоянием среды.*

*Ключевые слова: ионосфера, концентрация электронов, температура электронов, турбулентность.*

## **Preliminary results of SURA-SWARM campaign studies carried out in 2016-22**

A. O. Ryabov, V. L. Frolov

*The publication provides an overview of the SURA-SWARM campaigns conducted in 2016-22, in which studies of the Earth's upper ionosphere were carried out. These studies concerned the study of the excitation of turbulence in the ionosphere when it is exposed to powerful short-wave radio emission from the SURA facility. The most characteristic values of these disturbances, the conditions for their occurrence were determined, and comparisons were made of these artificial modifications with the natural state of the environment.*

*Keywords: ionosphere, electron concentration, electron temperature, turbulence.*

### **Введение**

Натурные эксперименты – это один из актуальных способов изучения плазменных явлений в ионосфере [1–4]. Среди них можно выделить метод пробных волн, метод вертикального зондирования сигналами ионосферных станций, ракурсное рассеяние радиоволн короткого и ультракороткого диапазонов, зондирование возмущённой области (ВО) ионосферы сигналами искусственных спутников Земли (ИСЗ) и другие. Но особенно интересным методом является использование ИСЗ, предназначенных для научных целей [3–5]. Наиболее интересны эксперименты, в рамках которых проводится стимуляция ионосферы стендами, расположенными на Земле. Главными инструментами для исследования данных явлений представляются значения плотности  $N_e$ , температуры электронов  $T_e$ , потенциала спутника и высыпания высокоэнергичных электронов. Наиболее продуктивным случаем использования бортовой аппаратуры для изучения особенностей верхней ионосферы является серия кампаний СУРА-DEMETER, проведённых в 2005-10 годах [6-8]. В них были определены многие характерные особенности искусственных плазменных возмущений и условия, при которых удается их сгенерировать и зарегистрировать. Интересным результатом стало обнаружение дактов плотности плазмы, которые представляют собой вытянутые крупномасштабные неоднородности.

### **Условия проведения экспериментов**

Группировка спутников 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 летают на высоте около 450 км параллельно друг другу на расстоянии до 500 км. Третий спутник летает в другой меридиональной плоскости на высоте 500 км. Используемый в наших экспериментах по модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами нагревный стенд «Сура» расположен вблизи рабочего посёлка Васильсурск в 120 км к востоку от г. Нижнего Новгорода (координаты стенда:  $56,15^\circ$  с. ш.,  $46,1^\circ$  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 в данной работе экспериментах стенд излучал мощные радиоволны с диаграммой направленности излучения волны накачки на  $14^\circ$  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 магнитосопряжённой области (МСО): для таких экспериментов нагрев должен был длиться примерно 40-45 минут.

### Результаты проведённых экспериментов

Необходимо сказать пару слов о том, чем интересна рассматриваемая область. Данная область является переходной от области ионосферы вблизи высоты отражения волны накачки (это примерно 250 км), где имеет место резонансное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой  $F_2$ -области, к области высот внешней ионосферы, где регистрируется формирование дактов плотности (около 660 км).

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 Рис. 1 приведён характерный пример сеанса пролёта ИСЗ над стендом «Сура», а на Рис. 2 – сеанс пролёта над МСО.

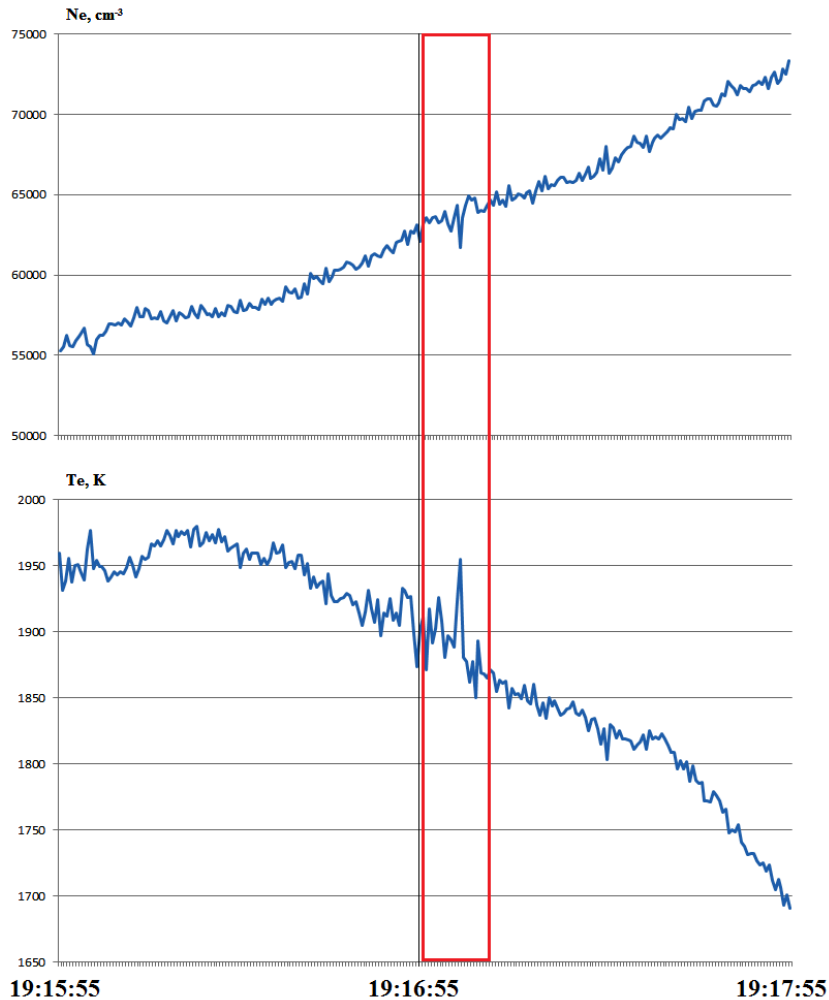
За годы кампаний было проведено около 150 сеансов по программе СУРА-SWARM. Большое количество проведённых сеансов позволило получить необходимый опыт по оптимизации проводимых экспериментов с целью достижения наилучших результатов. Таким образом, было определено, что плазма верхней ионосферы становится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

1. Эксперименты должны проводиться в вечерние и ночные часы.

Причины, почему днём практически не наблюдается возбуждение неоднородностей плазмы в следующем: а)  $D$ - и  $E$ - слои ионосферы днём значительно больше, из-за чего меньше мощности доходит до высоты отражения; б) на высоте области  $F_1$ -слоя возможно возникновение дефокусирующей линзы, что опять же приводит к уменьшению мощности; в) днём высота отражения возмущающей короткой от  $F_2$ -слоя ниже – что приводит к увеличению доли нейтральных частиц, которые негативно влияют на вероятность возбуждения турбулентности.

2. 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 омическим нагревом плазмы, развитием самофокусировочной неустойчивости и генерацией искусственных периодических неоднородностей (ИПН) в поле стоячей волны.



**Рис. 1. Сеанс пролёта в северном полушарии 25 апреля 2016 года. Красным прямоугольником обозначена область, в которой наблюдаются ИИН. Вертикальной линией обозначен центр возмущённой области.**

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

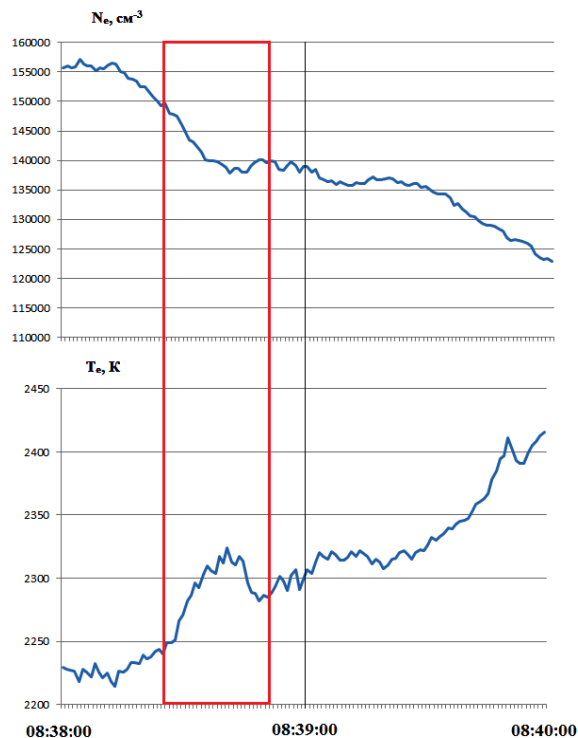
Это условие объясняется, как уже было отмечено выше, негативной ролью нейтральных частиц. Напомним, что на этих высотах количество «нейтралов» уменьшается в  $e$  раз.

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  $P_{эфф} \geq 50$  МВт.

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



**Рис. 2. Сеанс пролёта спутника SWARM в южном полушарии 17 сентября 2018 года.**

**Красным прямоугольником обозначена область, в которой наблюдаются ИИН.**

**Вертикальной линией обозначен центр возмущённой области.**

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.

#### **Заключение**

На высотах порядка 500 км вариации плотности и температуры электронов 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 оказывает 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 выполнялась в рамках научного проекта РФФ № 21-12-00385.*

## Литература

1. Формирование ОНЧ каналов при воздействии мощной радиоволны на F-слой ионосферы / В. В. Васьков [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 1993. – Т.33. – № 6. – С.91–97.
2. Фролов, В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Монография / В. Л. Фролов. – Нижний Новгород: Издательство ННГУ, 2017. – 468 с.
3. *Рябов А.О.* Определение ионного состава внешней ионосферы на основе характеристик КНЧ-СНЧ-волн, регистрируемых во время работы станда "СУРА". Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 11. С. 916-921. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2: Случайные поля. - М.: Наука, 1978. - 464 с.
4. *Рябов А.О.* Поляризационные характеристики КНЧ/СНЧ-волн, наблюдаемых во внешней ионосфере при воздействии мощным наземным КВ-радиоизлучением. В книге: Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Тезисы докладов XV Конференции молодых ученых. 2017. С. 92.
5. Рябов, А. О. Связь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62. – № 10. – С. 736-746.
6. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированные модификацией среднеширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами / В. Л. Фролов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62. – № 9. – С. 641-663.
7. Рябов, А. О. Искусственные высыпания энергичных электронов в магнитосопряженной относительно станда «Сура» области ионосферы / А. О. Рябов, В. Л. Фролов, А. Д. Акчурин // Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – № 4. – С. 285-296.
8. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F<sub>2</sub>-области мощным КВ радиоизлучением станда СУРА / В. Л. Фролов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. – 2016. – Т. 59. – № 3. – С. 198-222.