

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗМУЩЕННОЙ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО КАМПАНИЯМ СУРА-SWARM, ПРОВЕДЁННЫМ В 2021–24 ГОДАХ

В.Л. Фролов, А.О. Рябов, В.В. Фадин

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603022, Россия, Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23

Аннотация. В статье приведены предварительные итоги по проведённым в 2021–24 годах кампаниям СУРА-SWARM, в рамках которых проводились исследования верхней ионосферы Земли. Измерения характеристик плазменных возмущений на высотах орбиты спутников SWARM–A и C (высота ~ 450 км) и SWARM–B (высота ~ 500 км) проводились в годы роста солнечной (геомагнитной) активности. Эксперименты осуществлялись с использованием мощных радиоволн как O -, так и X -поляризаций. Особенностью этих измерений было то, что высокие значения критических частот позволяли выполнять их практически в любое время суток, включая и полуночные часы.

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

RESULTS OF STUDIES OF THE DISTURBED UPPER IONOSPHERE FROM THE SURA-SWARM CAMPAIGNS CONDUCTED IN 2021–24

V.L. Frolov, A.O. Ryabov, V.V. Fadin

Abstract. The article presents preliminary results of the SURA-SWARM campaigns conducted in 2021–24, which included studies of the Earth's upper ionosphere. Measurements of plasma disturbance characteristics at the orbital altitudes of the SWARM-A and C satellites (altitude ~ 450 km) and SWARM-B (altitude ~ 500 km) continued in 2021–2024, during the years of increasing solar (geomagnetic) activity. The experiments were carried out using powerful radio waves of both O- and X-polarizations. A feature of these measurements was that high values of critical frequencies made it possible to perform them at almost any time of the day, including midnight hours.

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

Введение

Наиболее результативными способами исследования верхней ионосферы Земли являются: метод вертикального зондирования сигналами ионосферных станций, ракурсное рассеяние радиоволн короткого и ультракороткого диапазонов, метод пробных волн, зондирование возмущённой области (ВО) ионосферы сигналами искусственных спутников Земли (ИСЗ) и другие. Ещё одним эффективным методом исследования является использование ИСЗ, предназначенных для научных целей [1–6]. Наиболее интересны эксперименты, в рамках которых проводится стимуляция ионосферы радиокомплексами, расположенными на Земле. Главными инструментами для исследования данных явлений представляются значения плотности N_e и температуры электронов T_e .

Условия проведения экспериментов

Набор спутников серии SWARM, состоящий из трёх одинаковых аппаратов, был выведен на орбиту в ноябре 2013 года. Аппараты имеют низкие круговые орбиты, лежащие в меридиональной плоскости. При этом два спутника (A и C) летают на высоте около 450 км параллельно друг другу на расстоянии до 500 км. Третий спутник (B) летает в другой меридиональной плоскости на высоте 500 км. Используемый в наших экспериментах по модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами нагревный стенд «Сура» расположен в 120 км к востоку от Нижнего Новгорода (координаты стендада: 56,15° с. ш., 46,1° в. д.). Эффективная мощность излучения стендада 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° 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 15 минут до пролёта спутника через возмущённую магнитную силовую трубку. Также проводились сеансы по обнаружению возмущения ионосферы в магнитосопряжённой области (МСО): для таких экспериментов нагрев должен был длиться около 45 минут.

Результаты проведённых экспериментов

В годы роста солнечной активности (2021–24 гг.) было проведено около 40 сеансов по программе СУРА-SWARM. Большое количество проведённых сеансов позволило определить, что плазма верхней ионосферы под воздействием коротковолнового возмущения становится заметно турбулизованной при выполнении ряда условий. Проведенные эксперименты в целом подтвердили ранее полученные необходимые условия для эффективной турбулизации верхней ионосферы:

1. Эксперименты должны проводиться в вечерние иочные часы.
2. Высота отражения волны накачки h должна быть выше 200 км.
3. Частота волны накачки $f_{\text{вн}}$ должна быть меньше критической частоты F_2 -слоя f_{0F2} .
4. Эффективная мощность волны накачки $P_{\text{эфф}} \geq 50$ МВт.

Кроме того, было подтверждено, что условия турбулизации для южного полушария (в магнитосопряжённой точке) идентичны условиям для северного полушария.

На условия проведения экспериментов большую роль оказывала высокая солнечная активность в сравнении с экспериментами в прежние годы.

В дневные часы (в освещенной Солнцем ионосфере) эксперименты проводились при: а) критических частотах F_2 -слоя ионосферы 8–12 МГц, когда частота волны накачки (ВН) часто отражалась далеко от его максимума слоя; б) при малых высотах отражения ВН $h \approx 180 – 210$ км; в) часто при заметном уровне естественной возмущенности ионосферы; г) слабо развитом, как правило, спорадическом слое F (F -spread). Все эти условия проведения измерений считаются неоптимальными, в которых не регистрировалось возбуждение плазменных возмущений ни в ионосфере над стендом СУРА, ни в магнитосопряжённой к ней ионосфере. В некоторых случаях в магнитосопряжённой ионосфере наблюдались периодические вариации концентрации ионосферной плазмы с периодом $T \approx 40$ с или с пространственным масштабом около 320 км вдоль орбиты спутника, которые можно отнести к проявлению перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), которые часто идентифицируются как внутренние гравитационные волны (ВГВ).

В поздние вечерние иочные часы (в слабо освещенной Солнцем ионосфере) критические частоты F_2 -слоя ионосферы были около 5–6 МГц и 4–5 МГц соответственно. Высота отражения ВН при этом увеличивалась до 230–270 км, что соответствовало оптимальным условиям модификации ионосферной плазмы мощными радиоволнами, излучаемыми стендом СУРА. Естественная ионосфера в таких условиях была, как правило, сильно возмущена с сильно развитым в ней F -spread. По результатам измерений отмечалось, что вочные часы в некоторых случаях возбужденный излучением мощной радиоволны искусственный F -spread еще долгое время (часы) регистрировался после выключения ВН, отвечая уже естественной своей структуре.

Важной особенностью проведения измерений на стенде СУРА в условиях сильной геомагнитной активности является смещение положения главного ионосферного провала (ГИП) к более южным широтам, когда при величине K_p индекса больше 3–4 он может опускаться до широт, соответствующих области нагрева ионосферы мощными радиоволнами. Детальные исследования свойств модификации ионосферной плазмы в присутствии ГИП было выполнено в работе [7] при анализе результатов измерений возмущенности ионосферной плазмы, проведенных в 2021 – 2023 гг. с помощью китайского спутника CSES. В ней было показано, что присутствие интенсивных естественных флюктуаций концентрации плазмы в ГИП маскирует развитие в нем искусственных плазменных возмущений. Эти результаты были подтверждены в рассматриваемых в докладе экспериментах со спутниками SWARM. Поэтому в годы повышенной геомагнитной активности такая ситуация часто являлась причиной невозможности надежной их регистрации во время проведения измерений. При этом, большая

изменчивость характеристик ГИП, а также влияние на них различных эффектов последействия от ранее случающихся магнитных бурь в ионосфере, объясняет сильную изменчивость свойств наблюдаемых явлений, что, естественно, усложняет их интерпретацию.

Кроме того, необходимо уточнить, что под тубуллизацией верхней ионосферы в этих экспериментах подразумевается наличие крупномасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), которые выражаются в заметных изменениях и вариациях концентрации и температуры электронов в возмущённой области и в увеличении вариаций этих характеристик. На Рис. 1 слева приведён характерный пример сеанса пролёта ИСЗ над стеном «Сура», а справа – сеанс пролёта над МСО.

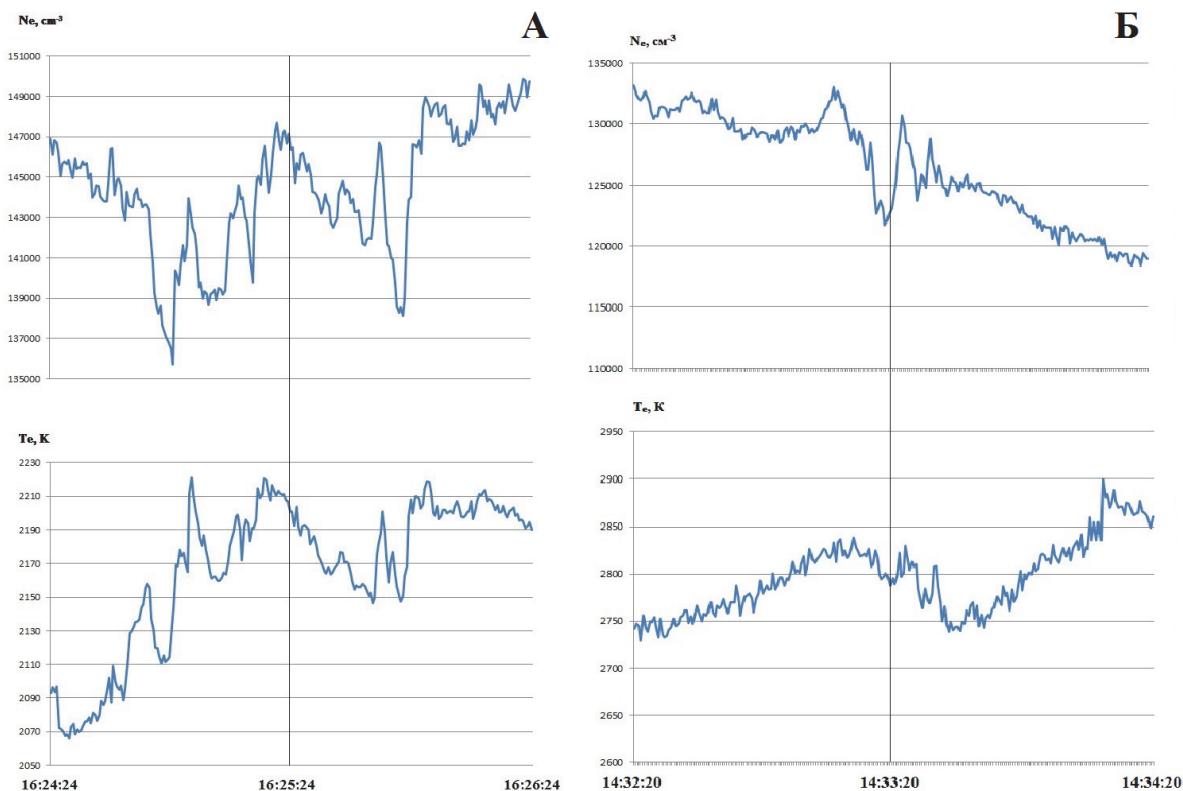


Рис. 1. Характерные сеансы возмущения верхней ионосферы под воздействием коротковолнового излучения стенда «Сура». Слева представлен сеанс пролёта в северном полушарии 5 ноября 2024 года, справа – пролёт спутника SWARM в южном полушарии 28 ноября 2022 года. Вертикальными линиями обозначаются центры возмущённых областей

Заключение

Проведенные в 2021–24 гг. эксперименты во многом подтвердили полученные в прежние годы результаты. В области высот 450–500 км наблюдается средний рост температуры электронов на величину до 10 % и сильные флуктуации её значений (до 7 %).

Из новых результатов стоит отметить следующее: важной особенностью проведения измерений на стенде СУРА в условиях сильной геомагнитной активности в условиях сильной геомагнитной активности является смещение положения главного ионосферного провала (ГИП) к более южным широтам.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников стенда СУРА и центра управления спутниками SWARM за помощь в организации и проведении экспериментов.

Исследования Фролова В.Л. в части анализа экспериментальных данных, полученных в 2021–2024 гг., выполнялись при финансовой поддержке РНФ (грант № 24-12-00459). Исследования Рябова А.О. и Фадина В.В. выполнялись при финансовой поддержке РНФ (грант № 25-22-00018).

Список литературы

1. Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы: монография. – Нижний Новгород: Издательство ННГУ, 2017. – 468 с.
2. 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.
3. Рябов А.О., Фролов В.Л. Связь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62. – № 10. – С. 736–746.
4. 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 // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62. – № 9. – С. 641–663.
5. Фролов В.Л., Рябов А.О., Акчурин А.Д. Искусственные высыпания энергичных электронов в магнитосопряженной относительно стенда «Сура» области ионосферы // Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – № 4. – С. 285–296.
6. 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 // Известия вузов. Радиофизика. – 2016. – Т. 59. – № 3. – С. 198–222.
7. Фролов В.Л., Першин А.В., Акчурин А.А., Чжан С., Васильев Р.В., Ермаков В.Ю., Лебедев В.П. Результаты экспериментальных исследований, выполненных по программе СУРА-CSES в 2018–2023 гг. // Космические исследования. – 2025. (направлена в печать).