

Особенности генерации плазменных возмущений на высотах 450 – 500 км при работе стенда СУРА

А.О. Рябов¹, В.Л. Фролов^{1,3}, Р.Ю. Лукьянова², А.С. Белов¹, И.А. Болотин¹, М.Н. Добровольский²

¹ НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия (e-mail: frolov@nirfi.unn.ru)

² ГЦ РАН, Москва, Россия

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Обсуждаются результаты выполненных с помощью ИСЗ SWARM измерений характеристик искусственных плазменных возмущений, которые возбуждаются на высотах 450 – 500 км при модификации F₂-слоя ионосферы мощными КВ радиоволнами, излучаемыми стендом СУРА. Получено, что на этих высотах наблюдаются вариации температуры и плотности плазмы в возмущенной магнитной силовой трубке, но ещё не обнаруживаются дакты с увеличенной плотностью плазмы.

The measurements of the characteristics of artificial plasma perturbations, which are excited at altitudes of 450 – 500 km by modification of the F₂-layer of the ionosphere by powerful HF radio waves emitted by the SURA stand, are discussed. It is obtained that at these altitudes there are variations in the temperature and density of the plasma in the perturbed magnetic force tube, but do not yet appear ducts with increased plasma density.

Введение

В настоящей работе рассматриваются результаты исследований характеристик возмущений плотности и температуры плазмы, индуцируемых на высотах внешней ионосферы при работе стенда СУРА. Начиная с 2005 г. такие исследования выполнялись с помощью бортовой аппаратуры ИСЗ DEMETER и DMSP (высоты орбит ~ 660 км и ~ 840 км соответственно). Их результатом явилось обнаружение формирования дактов с избыточной плотностью плазмы в магнитной силовой трубке, опирающейся на область с сильно развитой ИИТ вблизи высоты отражения ВН [1-4]. Отсутствие формирования дактов в условиях дневной ионосферы, как и вообще низкий уровень возбуждаемой в это время суток ИИТ, определяется поглощением мощности ВН при её распространении в нижней ионосфере, образованием дефокусирующей линзы на высотах 130 – 170 км, сильно уменьшающей плотность потока энергии ВН на высотах верхней ионосферы, низкими высотами отражения ВН, а также присутствием фотоэлектронов в ионосфере [5]. Все эти факторы приводят к уменьшению эффективности взаимодействия мощной радиоволны O-поляризации с ионосферной плазмой.

Важно подчеркнуть, что в настоящее время имеется лишь ограниченный объём данных о свойствах плазменной турбулентности в области высот 400 – 500 км, в которой имеет место переход от области с уменьшенной плотностью плазмы вблизи высоты отражения ВН (область сильного нагрева ионосферы вблизи максимума F₂-слоя) к области с повышенной плотностью на высотах внешней ионосферы (область формирования дактов с избыточной плотностью плазмы в возмущённой магнитной силовой трубке). Считается, что формирование дактов определяется выносом плазмы из области её сильного разогрева [3, 4]. Ясно, что знание характеристик плазменной турбулентности в области высот ~ 500 км позволило бы детализировать особенности

механизмов транспорта плазменных возмущений из области с наиболее интенсивной генерацией ИИТ вблизи высоты отражения ВН во внешнюю ионосферу.

Постановка экспериментов

В данной работе мы представляем результаты исследований характеристик возбуждаемых во внешней ионосфере искусственных плазменных возмущений (возмущений плотности и температуры плазмы, в первую очередь), выполненных в 2016 и 2017 гг. с помощью бортовой аппаратуры европейских спутников серии SWARM. В номинальном режиме два ИСЗ (SWARM А и С) летят на высоте ~ 450 км параллельно друг другу на расстоянии 50 – 1000 км, наклонение орбиты 87.4° . Третий ИСЗ (SWARM В) летит в другой меридиональной плоскости на высоте ~ 500 км, наклонение орбиты 88° .

Все ИСЗ SWARM оснащены идентичной аппаратурой. Основным их модулем является комплекс для магнитных измерений: высокочувствительные векторный и скалярный магнетометры для определения величины и направления полного вектора и вариаций магнитного поля с точностью до 0.1 – 0.5 нТл. Эти магнетометры позволяют проводить измерения по широкому кругу задач, включая измерения напряжённости главного магнитного поля Земли, литосферного поля и внешнего магнитного поля, которое создаётся ионосферными токами, текущими между магнитосферой и ионосферой. Кроме магнитометрической аппаратуры ИСЗ SWARM оснащены инструментами EFI для измерения электрического поля. Более подробное описание аппаратуры ИСЗ SWARM можно найти в [6]. В наших измерениях использовались данные ленгмюровских зондов для определения вариаций электронной плотности и температуры плазмы и для измерения потенциала корпуса ИСЗ.

Нагревный стенд СУРА расположен вблизи р/п Васильсурск в 120 км к востоку от г. Нижнего Новгорода (координаты стенда: $\varphi_0 = 56,15^\circ$ с. ш., $\lambda_0 = 46,1^\circ$ в. д.). Эффективная мощность излучения стенда в режиме синхронного излучения всех трёх его модулей с максимальной мощностью составляет 80 МВт на частотах излучения $f_{ВН} \approx 4.3$ МГц, увеличиваясь с ростом $f_{ВН}$ до ~ 180 МВт на частотах $f_{ВН} \approx 6.5$ МГц. В выполняемых на стенде СУРА экспериментах излучение ВН начиналось, как правило, за ~ 15 мин до времени пролёта ИСЗ через возмущённую магнитную силовую трубку.

Всего в 2016 – 2017 гг. было выполнено около 60 сеансов нагрева ионосферы по программе СУРА–SWARM при различных условиях их проведения. Полученные здесь результаты позволили сформулировать необходимые условия для возбуждения возмущений плотности и температуры на высотах $h \approx 450 - 500$ км и определить их основные характеристики. Было установлено, что генерация искусственных плазменных возмущений достаточно высокого для их обнаружения уровня наблюдалась только при работе стенда в вечерние и ночные часы в условиях, когда частота мощной радиоволны не превышала 6 МГц, была ниже критической частоты F_2 -слоя ионосферы f_{0F_2} , высота отражения ВН была больше 200 км, а орбита ИСЗ проходила на расстоянии меньше 60 км от центра возмущённой магнитной силовой трубки. В большинстве случаев генерация искусственных плазменных возмущений наблюдалась, когда эффективная мощность излучения ВН была не меньше 40 МВт. Следует отметить, что все условия для генерации плазменных возмущений на высотах ~ 500 км полностью повторяют условия для формирования дактов плотности плазмы на высотах внешней ионосферы (на высотах ~ 660 км) [3].

Анализ результатов измерений

Для демонстрации наблюдаемых явлений мы рассмотрим характеристики возмущений плотности и температуры плазмы, а также потенциал спутника для сеанса

за 25 апреля 2016 год. ИСЗ SWARM (В) пролетал в условиях ночной ионосферы ($T^* = 19:16:55$ UT) на высоте 514 км в направлении с севера на юг практически через центр возмущённой магнитной силовой трубки. Модификация ионосферы началась за 16 мин до пролёта ИСЗ через трубку. ВН излучалась на частоте $f_{ВН} = 4300$ кГц при $f_{0F2} = 4.6$ МГц, высота отражения ВН была равна $h \approx 240$ км. Эксперимент проводился в очень спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 10$). Особенностью этого сеанса явилась низкая эффективная мощность излучения ВН, $P_{эфф} = 20$ МВт. Тем не менее, даже при такой мощности $P_{эфф}$ наблюдалось развитие очень сильной диффузности на ионограммах, а приборами ИСЗ были зарегистрированы хорошо заметные искусственные вариации плотности и температуры плазмы.

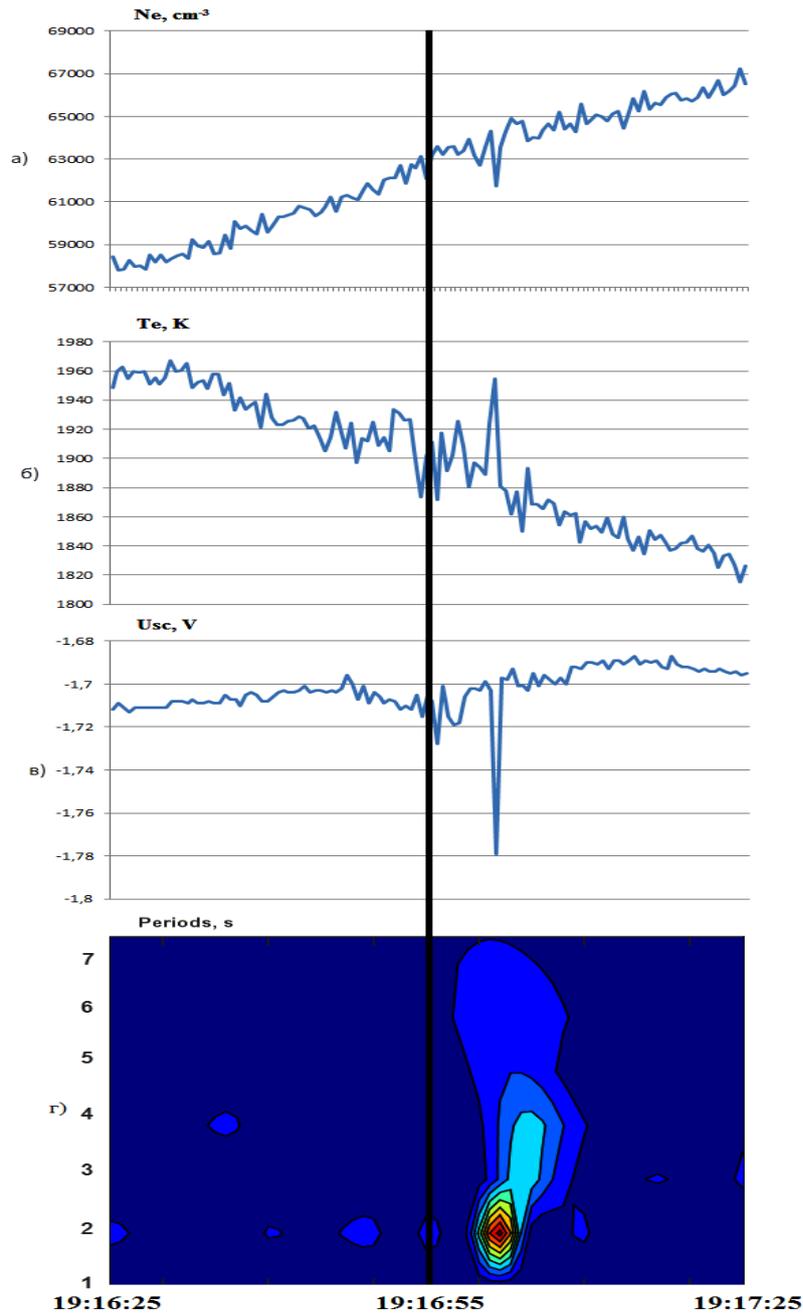


Рис. 1.

На рис. 1 представлены результаты измерения концентрации электронов N_e (панель а), температуры электронов T_e (панель б) и потенциал спутника (панель в). По оси

абсцисс отложено время пролёта спутника в UT. Вертикальной линией отмечено время $T^* = 19:16:55$ UT. По результатам измерений концентрации N_e видно появление искусственных вариаций плотности плазмы на интервале времени 19:16:48 до 19:17:03 UT величиной 1.6 – 3.1% с максимальными их значениями в 19:16:59 UT. Эти измерения позволяют оценить размер области с искусственными вариациями плотности плазмы вдоль орбиты спутника как ~ 100 км, что несколько превышает размер ионосферы, засвеченной пучком мощных радиоволн на высоте отражения ВН (~ 70 км), причём центр области с максимальными возмущениями смещён на юг на ~ 50 км от точки максимального сближения для T^* , отражая влияние эффекта «магнитного зенита». На несколько большем интервале времени с 19:16:46 до 19:17:07 UT (на расстоянии ~ 170 км вдоль орбиты ИСЗ) регистрируются искусственные вариации температуры электронов величиной 1 – 2% с максимальными их значениями $\sim 3\%$ в 19:16:59 UT. Увеличения среднего уровня плотности плазмы в этом сеансе не наблюдалось, а увеличение T_e не превышало 1%. Из рисунка хорошо видно, что выделяющийся на записи максимум значения T_e в 19:17:01 UT точно совпадает с минимумом значения N_e .

Обращает на себя внимание практически полная корреляция поведения T_e и потенциала ИСЗ U_{sat} вплоть до деталей, когда увеличение температуры плазмы сопровождается увеличением отрицательного потенциала спутника. Потенциал металлического корпуса ИСЗ в первом приближении пропорционален величине $-kT_e$ (k – постоянная Больцмана), поэтому вариации температуры напрямую влияют на величину потенциала U_{sat} .

На рис. 12 приведены результаты вейвлет анализа вариаций плотности плазмы. Видно, что во время пролёта ИСЗ через возмущённую магнитную силовую трубку (на рисунке это соответствует времени 60 – 65 с) эти вариации имеют характерный период $T \approx 2$ с, что соответствует размерам неоднородностей ~ 16 км вдоль орбиты ИСЗ (практически в ортогональном к геомагнитному полю направлении).

Шесть сеансов программы СУРА-SWARM, в которых были получены наиболее значимые результаты, приведены в Таблице 1. В ней время дано в UT: $T_{\text{UT}} = T_{\text{МСК}} - 3$ часа для измерений в 2016 – 2017 гг. Во втором столбце приведены значения времени T^* наибольшего сближения орбиты ИСЗ с центром возмущённой магнитной силовой трубки и значение при этом расстояния до центра трубки D^* . В четвёртом столбце приводятся значения высоты отражения ВН $h_{\text{отр}}(\text{км})$ и ΣK_p – величина суммарного за сутки планетарного индекса геомагнитной возмущённости).

На основе выполненных в 2016 – 2017 гг. измерений характеристик плазменных возмущений, можно констатировать, что на высотах 450 – 500 км не было обнаружено характерных для дактов изменений плотности плазмы с размерами ~ 100 км поперёк линий геомагнитного поля, ранее обнаруженных на высотах ~ 660 км в экспериментах с ИСЗ DEMETER [1-4]. Также было установлено, что на высотах 450 – 500 км вариации плотности и температуры плазмы обнаруживаются на расстояниях 100 – 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 [5, 7-9]. Отмечается, что, как и в случае формирования дактов плотности плазмы, на пространственное распределение искусственных плазменных возмущений на высотах ~ 500 км сильное влияние оказывает эффект «магнитного зенита». В целом, как показали выполненные эксперименты, должны выполняться одни и те же условия для формирования дактов на высотах ~ 660 км и плазменных

возмущений на высотах ~ 500 км, что может указывать на определённую общность механизмов их образования.

Таблица 1.

№	Дата. Номер ИСЗ. T^* (УТ) D^* (км)	Время излучения ВН (УТ). $f_{ВН}$ (кГц) $P_{эфф}$ (МВт)	f_{0F2} (кГц) $h_{отр}$ (км) ΣK_p	Характер эффектов воздействия.	Высота ИСЗ. Уровень F_{spread} . Примечания.
1	25 апреля 2016 SWARM-B 19:16:55 Центр ДН.	19:01:00 – 19:18:00 4300 20	4.7 240 10	С 19:16:48 до 19:17:03 есть вариации N_e до 3% и вариации T_e до 3% с $l \approx 16$ км.	($h = 514$ км). Возбуждена очень сильная диффузность.
2	27 августа 2016 SWARM-C 17:22:06 18 км (к западу).	17:06:00 – 17:23:00 4300 55	5.1 → 4.9 230 9	С 17:21:58 до 17:22:12 увеличение T_e на 14%, вариации $N_e \sim 3\%$ и вариации $T_e \sim 8\%$ с $l \approx$ 13 км.	($h = 452$ км). Очень сильная диффузность. E_s с f_{0Es} до 4 – 4.5 МГц.
3	30 августа 2016 SWARM-C 17:03:24 22 км (к востоку).	16:48:00 – 17:04:00 4720 95	5.6 240 43	С 17:03:16 до 17:03:23 максимум N_e с увеличением на 3%. Возможно есть вариации $N_e \sim 1.3\%$ с $l \approx 12$ км с 17:03:16 до 17:03:33. Увеличение среднего уровня T_e на 1%.	($h = 452$ км). Диффузность среднего уровня. Большие шумы в T_e .
4	23 мая 2017 SWARM-C 17:10:20 40 км (к западу).	16:56 – 17:11 4300 50	4.6 235 15 ⁻	Чётко выраженные уменьшения плотности N_e до 7% с $L \approx 45$ км на расстоянии ~ 200 км вдоль орбиты ИСЗ. Рост T_e на $\sim 2\%$ на расстоянии ~ 80 км полностью кор- релирует с увеличением отрицательного потен-циала ИСЗ на \sim 3%. Вариации $T_e \approx 1 - 2\%$ с $l \approx 14$ км.	($h = 452$ км) E_s с f_{0Es} до 7 МГц. Развилась сильная диффузность.
5	27 мая 2017 SWARM-B 21:40:34 22 км (к	± 3 мин до 21:27 (нагрев закончил-ся на 13 мин рань-ше пролета ИСЗ)	4.3 ~ 280 13 ⁺	Есть вариации $N_e \approx$ 2% и $T_e \approx 0.7\%$ с увеличением T_e на \sim 1%. Размер области с плазменными	($h = 514$ км) Диффузность к T^* уже сильно уменьшилась. К 21:29 критическая

	востоку).	4740 85		возмущениями составляет ~ 110 км.	частота f_{0F2} упала до 4.3 МГц.
6	7 сентября 2017 SWARM-C 18:59:42 (центр ДН).	18:46 – 19:00 4300 55	4.4 260 29	Наличие вариаций в N_e определить трудно. Есть вариации $T_e \approx$ 5% с $l \approx 12$ км. Возмущения наблюдаются на расстоянии $L \approx 210$ км.	($h = 452$ км) E_s до 4 МГц. Развивается очень сильная диффуз- ность, пропали следы O- и X- мод.

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что на высотах 450 – 500 км наиболее интенсивными являются неоднородности плотности плазмы с размерами $l \approx 10 - 15$ км в ортогональном к геомагнитному полю направлении и с амплитудой $\delta N \approx 3\%$. Заметим, что 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% [10], и внутри дактов, где они, согласно [3], имеют амплитуду δN до 10%. Таким образом, генерация крупномасштабных ИИН с $l \approx 10 - 15$ км обнаруживается в широком интервале высот от высоты отражения ВН до высот внешней ионосферы (~ 660 км). При этом получается, что они имеют наименьшую интенсивность именно в промежуточной области на высотах ~ 500 км. Ясно, что учёт только термодиффузионных процессов не может объяснить такое их распределение по высоте.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-05-00475. Работа Рябова А.О. выполнялась при поддержке государственного задания Минобрнауки России (проект № 3.1844.2017/ПЧ).

Литература

1. Рапопорт В.О., Фролов В.Л., Комраков Г.П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 2007. Т. 50, № 8. С. 709.
2. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П. и др. // Письма в ЖЭТФ, 2008б. Т. 88, вып. 12. С. 908.
3. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 2016. Т. 59, № 3. С. 198.
4. Milikh G.M., Demekhov A., Vartanyan A. et al. // Geophys. Res. Lett., 2012. Vol. 39, L10102, doi:10.1029/2012GL051718.
5. Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Монография. Изд. ННГУ, 2017, 468 с.
6. N. Olsen, E F-Christensen, R. Floberghagen, et al. // Earth Planets Space, 2013, vol. 65, p. 1189.
7. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
8. Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др. // УФН, 2007. Т. 177. № 3. С. 330.
9. Фролов В.Л. // Солнечно-земная физика, 2015. Том 1, № 2. С. 22-45. Doi:10.12737/10383.
10. Фролов В.Л., Шорохова Е.А., Куницын В.Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 2015а. Т. 58, № 10. С. 797.