

Том II, с. 100–103

УДК: 550.3 + 530.182 + 533.951

ВЫСОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАКТОВ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

В. Л. Фролов^{1,2}, И. А. Болотин¹, А. О. Рябов¹, Е. А. Шорохова¹, Е. С. Андреева³,
А. М. Падохин³

¹Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 603950,
г. Нижний Новгород, ул. Б.-Печерская 25/12а

E-mail: frolov@nirfi.unn.ru

²Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18

³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, г. Москва,
Ленинские горы, д. 1. Физический факультет МГУ

E-mail: padokhin@physics.msu.ru

Аннотация. Представлены результаты измерений пространственных характеристик дактов плотности плазмы, формирующихся на высотах внешней ионосферы при модификации $F2$ -области мощными КВ радиоволнами. Установлено, что дакты регистрируются, начиная с высот ~ 500 км, что относительная величина вариаций плотности плазмы в них слабо зависит от высоты для $h \approx 500\text{--}800$ км и что их поперечный размер по отношению к линиям геомагнитного поля увеличивается с ростом высоты.

Ключевые слова: модификация ионосферной плазмы мощными радиоволнами; дакты плотности плазмы; спутниковые измерения; радиотомография

ALTITUDE FEATURES OF PLASMA DENSITY DUCTS

V. L. Frolov, I. A. Bolotin, O. A. Ryabov, E. A. Schrokhova, E. S. Andreeva,
A. M. Padokhin

Abstract. The results of measurements of the spatial characteristics of plasma density ducts formed at the heights of the external ionosphere, when the $F2$ region is modified by high-power HF radio waves, are presented. It is found that such ducts are registered at heights higher than ~ 500 km, the relative magnitude of plasma density variations in them is weakly dependent on altitude for $h \approx 500\text{--}800$ km, and their transverse size with respect to geomagnetic field lines increases with altitude.

Keywords: modification of the ionosphere plasma by powerful radio waves; plasma density ducts; satellite measurements; radio tomography

Введение

Модификация $F2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами обыкновенной поляризации приводит к развитию в ней разного рода нелинейных явлений и плазменных неустойчивостей. Это вызывает генерацию вблизи высоты отражения волны накачки (ВН) высокочастотной и низкочастотной плазменной турбулентности, сильный разогрев плазмы, ускорение электронов до сверхтепловых энергий, генерацию электрических полей и токов, изменение формы профиля плазмы и др. Одним из результатов модификации $F2$ -области ионосферы является генерация на высотах внешней ионосферы дактов с увеличенной плотностью плазмы [1–3]. Модель формирования дактов за счёт выноса плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля из сильно разогретой области ионосферы, где происходит резонансное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой, рассматривалась, например, в [4].

Одной из важных характеристик таких дактов является высотная зависимость плотности плазмы в них и их размеров относительно линий геомагнитного поля. До настоящего времени эти параметры получались, в основном, с помощью спутниковых измерений на высоте орбиты ИСЗ [1–3], которые не давали всей требуемой информации, поскольку пересечение спутником возмущённой магнитной силовой трубки происходит достаточно редко из-за малого (~ 100 км) поперечного размера трубки (дакта) [1]; также разные ИСЗ пересекают дакт в разное время суток

и на разных высотах, привнося суточную и высотную зависимости исследуемых характеристик в результаты измерений.

В докладе представлены результаты исследований характеристик дактов плотности плазмы, полученные методом низкоорбитальной радиотомографии [5] при модификации среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами O -поляризации, излучаемыми стендом СУРА (его координаты $\varphi = 56.15^\circ$, $\lambda = 46.1^\circ$). Начиная с 2002 г., эти исследования постоянно проводятся на стенде СУРА (см., например, [5–7]). В них используются ИСЗ PARUS, TRANZIT, COSMOS и e-PoP. Ниже рассматривается один из примеров таких измерений, который демонстрирует возможности предлагаемого метода. Для его реализации около стенда вдоль орбиты ИСЗ разворачивается цепочка из трёх приёмных пунктов на расстоянии 100–150 км между соседними пунктами, в которых проводится регистрация сигналов ИСЗ на двух когерентных частотах 150 и 400 МГц. Это позволяет проводить измерения вариаций полного электронного содержания на луче ИСЗ–приёмник, по которым, следуя [5], затем восстанавливаются пространственные вариации флуктуаций плотности плазмы в ионосфере над стендом СУРА (см. рис. 1 ниже). При высоте используемых ИСЗ ~ 1000 км и геометрии приёмных пунктов, такое восстановление возможно в интервале высот 200–800 км [5]. Приёмники также регистрируют вариации амплитуды принимаемых сигналов, что позволяет исследовать мелкомасштабную (меньше 1 км) неоднородную структуру возмущённой области ионосферы.

Выполненные эксперименты и полученные в них результаты

1. Пример полученной радиотомографической реконструкции.

На рис. 1 приведён пример радиотомограммы, полученной в измерениях 18 августа 2011 г. в предполуночные часы 18:48 UT (22:48 мск) с использованием радиосигналов с ИСЗ COSMOS-2407 и построенной в изолиниях плотности плазмы. Модификация ионосферы в этом сеансе измерений осуществлялась на частоте 4785 кГц при критической частоте $f_oF2 \approx 5.2$ МГц с эффективной мощностью излучения ВЧ $P_{эфф} = 50$ МВт в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 11+$). Нагрев ионосферы проводился с 21:01 до 22:51 мск в режиме периодического воздействия [10 мин — излучение, 10 мин — пауза]. Ионозонд, расположенный рядом со стендом СУРА, зарегистрировал возбуждение F -рассеяния среднего уровня. ИСЗ пролетал через возмущённую магнитную силовую трубку во время цикла нагрева 22:41–22:51 мск. Подробный анализ полученных в этом цикле измерений экспериментальных данных был приведён в [7].

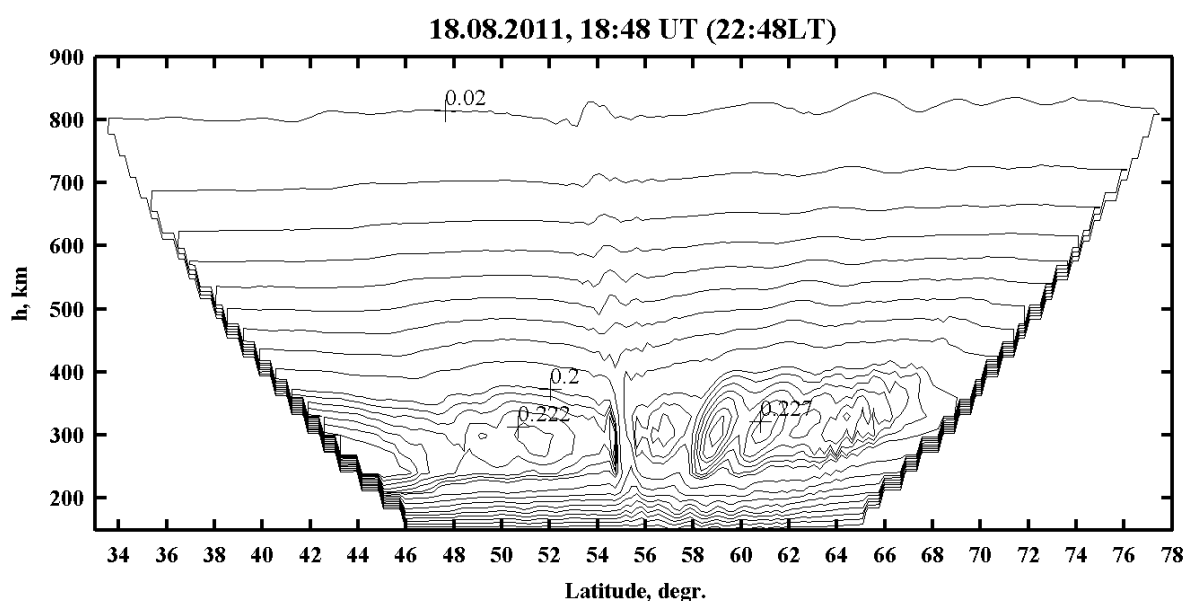


Рис. 1. Радиотомограмма, полученная 18.08.2011 в 22:48 мск.

Томограмма захватывает вдоль орбиты ИСЗ приблизительно интервал широт $40^\circ - 70^\circ$, что соответствует дальности в северо-южном направлении ~ 3300 км. На ней хорошо видно, что выше стенда СУРА в диапазоне высот от 200 до 400 км (в области максимума $F2$ -слоя ионосферы) наблюдается образование полости с уменьшенной на $\sim 30\%$ плотностью плазмы, которая вытянута вдоль силовых линий геомагнитного поля. На высотах $h \geq 500$ км хорошо видно формирование дакта с увеличенной плотностью плазмы, также вытянутого вдоль геомагнитного поля, который не обнаруживается на высотах ~ 400 км. Отсутствие формирования дакта на высотах 450–500 км было недавно подтверждено в экспериментах с ИСЗ SWARM [8].

На томограмме также хорошо различимы волновые структуры, которые отвечают волновым возмущениям (ВВ), возбуждённым в ионосфере в условиях, когда до пролёта ИСЗ через возмущённую магнитную силовую трубку осуществлялось в течение почти 2 часов воздействие на ионосферу мощными радиоволнами в режиме периодического излучения ВН. Анализ характеристик таких ВВ для рассматриваемого сеанса измерений приведён в [7]. Их характеристики подробно анализировались в [9].

II. Характеристики искусственных высыпаний на средних широтах.

Как показала детальная обработка данных, полученных в рассматриваемом в докладе сеансе измерений, на высотах вблизи отражения мощной радиоволны (~ 260 км) наблюдается наибольшее уменьшение плотности плазмы на величину $\sim 30\%$. Эта полость с уменьшенной плотностью плазмы может рассматриваться как фокусирующая линза для проходящих через неё радиоволн. В интервале высот 400–500 км наблюдаются вариации плотности плазмы, которые не носят какого-то регулярного характера. Согласно [8], на этих высотах регистрируются большие вариации температуры электронов плазмы, величина которых уменьшается с ростом высоты. Выше 500 км начинает регистрироваться дакт с увеличенной плотностью плазмы. Выполненный анализ полученных экспериментальных данных приводит к выводу, что на высотах выше максимума $F2$ -слоя величина относительного приращения плотности плазмы в дакте слабо зависит от высоты h .

Полученные в этом сеансе измерений экспериментальные данные показывают, что с ростом высоты h от 500 до 800 км наблюдается рост размера дакта вдоль орбиты ИСЗ (приблизительно в северо-южном направлении поперёк линий геомагнитного поля) от ~ 65 км, что соответствует размерам центральной части возмущённой области ионосферы, где поглощается основная доля энергии ВН, до ~ 120 км.

За прошедшие годы исследований собран материал по 12 радиотомографическим реконструкциям, полученным в различное время суток, при различных ионосферных и геомагнитных условиях. Их обработка и анализ будут выполнены в ближайшее время. Это позволит уточнить характеристики возбуждаемых во внешней ионосфере дактов плотности плазмы и определить пределы вариаций их характеристик.

Заключение

В настоящей работе впервые представлены результаты анализа измерений характеристик создаваемых излучением стенда СУРА искусственных вариаций плотности плазмы, полученные в одном эксперименте в области высот 200–800 км с использованием метода низкоорбитальной радиотомографии. Эти измерения относятся к диапазону высот, где наблюдается переход от области ионосферы вблизи высоты отражения ВН, в которой имеет место резонансное взаимодействие мощной радиоволны O -поляризации с плазмой $F2$ -области, генерация интенсивной искусственной ионосферной турбулентности и сильный разогрев электронов, следствием чего является формирование на высотах 200–400 км полости с дефицитом плотности плазмы (фокусирующей линзы), к области высот внешней ионосферы, где регистрируется формирование дактов с повышенной плотностью плазмы внутри возмущённой магнитной силовой трубки, опирающейся на область с сильно развитой искусственной ионосферной турбулентностью [3, 10]. Как продемонстрировано в докладе, эти измерения позволяют получить зависимость от высоты таких характеристик дактов, как величину приращения в них плотности плазмы по сравнению с её фоновой концентрацией и размеры дакта в северо-южном направлении в ортогональной к

геомагнитному меридиану плоскости. Эти данные по указанным в докладе причинам тяжело получить с помощью измерений с борта орбитальных ИСЗ. В докладе разобран лишь единичный пример. Однако накопленный за более чем 10 лет банк данных радиотомографических измерений позволяет уже сегодня провести их детальный анализ и получить необходимую информацию об особенностях формирования дактов плотности плазмы на высотах внешней ионосферы. Последнее важно как для развития модели генерации дактов, так и для разработки методов управления ионосферно-магнитосферными связями с помощью таких дактов.

Благодарности

Исследования Фролова В. Л. выполнялись при финансовой поддержке Минобрнауки (грант № 3.1844.2017/4.6). Исследования Болотина И. А. выполнялись при поддержке РФФИ (грант № 17-05-00475). Исследования Рябова А. О. выполнялись при поддержке РФФИ (грант № 19-52-15007); исследования Падохина А. М. и Андреевой Е. С. выполнялись при поддержке РФФИ (гранты № 17-05-01250 и № 19-05-00941).

Список литературы

1. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Шорохова Е. А. и др. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F_2 -области мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. — 2016. — Т. 59, № 3. — С. 198–222.
2. Vartanyan A., Milikh G. M., Mishin E. et al. Artificial ducts caused by HF heating of the ionosphere by HAARP // *J. Geophys. Res.* — 2012. — Vol. 117. — A10307, doi:10.1029/2012JA017563.
3. Streltsov A. V., Berthelier J. -J., Chernyshov A. A., Frolov V. L. et al. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space // *Space Science Review.* — 2018. — 214:118, <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>.
4. Milikh G. M., Demekhov A., Vartanyan A. et al. A new model for formation of artificial ducts due to ionospheric HF-heating. // *Geophys. Res. Lett.* — 2012. — Vol. 39. — L10102, doi:10.1029/2012GL051718.
5. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. — М.: Физматлит, 2007. — 255 с.
6. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. Модификация ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением. // УФН. — 2007. — Т. 177, № 3. — С. 330–340.
7. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L. et al. Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigation satellite radio transmissions. // *Radio Sci.* — 2012. — Vol. 47. — RS0L15, doi:10.1029/2011RS004957.
8. Фролов В. Л., Лукьянова Р. Ю., Белов А. С. и др. Характеристики плазменных возмущений, возбуждаемых на высотах 450 – 500 км при работе стенда СУРА. // Изв. вузов. Радиофизика. — 2018. — Т. 45, № 5. — С. 359–373.
9. Черногор Л. Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: Монография. — Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2014. — 544 с.
10. Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. — Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2017. — 468 с.