

Тонкая структура дактов плотности, формируемых при активном радиочастотном воздействии на лабораторную и космическую плазмы

В. Л. Фролов^{+×1)}, В. О. Рапопорт⁺, Е. А. Шорохова⁺, Н. А. Айдакина, М. Е. Гуштин, И. Ю. Зудин, С. В. Коробков, А. В. Костров, М. Парро^{*2)}, Ж.-Л. Рош^{*2)}

⁺ Научно-исследовательский радиофизический институт, 603950 Н.Новгород, Россия

Институт прикладной физики РАН, 603950 Н.Новгород, Россия

^{*} Laboratoire de Physique et Climie de l'Environnement (LPCE), BP 37460-21074 Orleans, France

[×] Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Казань, Россия

Поступила в редакцию 16 декабря 2014 г.

После переработки 30 января 2015 г.

Представлены результаты активных ионосферных и модельных лабораторных экспериментов по генерации искусственных неоднородностей замагниченной плазмы (дактов плотности), которые могут использоваться в качестве волноводных каналов для низкочастотных волн. Установлено, что в определенных условиях формирующиеся при локализованном высокочастотном нагреве плазмы дакты имеют тонкую структуру – содержат в себе неоднородности плотности плазмы, которые существенно влияют на распространение низкочастотных волн, обеспечивая глубокую амплитудную модуляцию низкочастотного излучения и изменяя его пространственную структуру. Предложен механизм образования таких неоднородностей.

DOI: 10.7868/S0370274X15050069

1. Искусственные неоднородности околосферной замагниченной плазмы – дакты плотности, вытянутые вдоль линий геомагнитного поля – представляют значительный интерес как волноводные каналы для электромагнитного излучения различных частотных диапазонов [1]. В первую очередь, такие неоднородности могут способствовать повышению эффективности транспортировки излучения наземных длинноволновых передатчиков в магнитосферу Земли и его распространения по длинным магнитосферным трассам. Формирование дактов плотности в замагниченной плазме за счет ее локализованного высокочастотного нагрева и последующего термодиффузионного перераспределения в условиях модельного лабораторного эксперимента, включая вопросы динамики формирования дактов и величины их характерных масштабов в перпендикулярном к внешнему магнитному полю направлении рассмотрено в [2, 3]. Возможность формирования искусственных дактов плотности плазмы на высотах внешней ионосферы Земли в последние годы была подтверждена экспериментально при проведении нагревных эксперимен-

тов с помощью коротковолновых (КВ) стенов СУРА (Россия) [4] и HAARP (США) [5]. Обнаружение подобных структур в естественных условиях открывает широкие перспективы для проведения фундаментальных исследований и различного рода приложений.

На первом этапе исследований основное внимание уделялось изучению крупномасштабной структуры дактов, определяемой в случае лабораторного моделирования размерами плазменной области, занятой высокочастотным полем модифицирующей плазму волны накачки, и характерными масштабами термодиффузионных процессов в плазме [6]. Между тем ряд последних ионосферных экспериментов указывает на то, что дакты могут иметь мелкомасштабную структуру, т.е. включать в себя неоднородности плотности плазмы с размерами поперек геомагнитного поля от десятков метров до 10 км [7]. Такие неоднородности способны существенным образом изменять режимы распространения волн диапазона крайне низких и очень низких частот (КНЧ–ОНЧ) за счет трансформации их спектра волновых векторов и амплитудно-частотных характеристик [8].

Рассмотрению условий формирования мелкомасштабной структуры дактов плотности и их свойств,

¹⁾ e-mail: frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru

²⁾ M. Parrot, J.L. Rauch

формируемых при высокочастотном (ВЧ) нагреве замагниченной плазмы в лабораторных условиях и в ионосфере Земли и посвящена данная работа. При этом оба типа экспериментов являются взаимодополняющими. В лабораторной плазме удастся измерить динамические характеристики плазменных возмущений и оценить их влияние на распространение электромагнитного излучения, а в ионосфере – провести измерения в фактически безграничной плазме со стабильными и хорошо известными характеристиками.

2. Исследования характеристик искусственных плазменных образований, индуцируемых на высотах внешней среднеширотной ионосферы Земли при модификации F2-области мощными КВ-радиоволнами О-поляризации, проводились на нагревном стенде СУРА (ФГБНУ НИРФИ, г. Нижний Новгород) с использованием бортовой аппаратуры французского микроИСЗ (искусственного спутника Земли) DEMETER. Этот ИСЗ имел солнечно-синхронную полярную орбиту с высотой ~ 660 км и пролетал над стендом СУРА приблизительно в 22:00–22:30 местного времени, что соответствовало условиям ночной ионосферы. Спутник DEMETER обладал уникальным набором инструментов, позволяющим проводить измерения основных параметров плазмы, включая концентрацию и температуру, ионный состав, скорость ионов, электрические поля в диапазоне частот от 0 до 3.3 МГц, магнитные поля в диапазоне частот от 10 Гц до 30 кГц, потоки энергичных электронов. Подробное описание характеристик размещенной на спутнике аппаратуры приведено в спецвыпуске журнала *Planetary and Space Science*, **54**(5) (2006). При проведении измерений для создания искусственных плазменных возмущений в ионосфере Земли стенд включался на 15–20 минут за 10–15 минут до времени наибольшего сближения ИСЗ с центром возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на область с интенсивной искусственной ионосферной турбулентностью, возбуждаемой вблизи высоты отражения мощной радиоволны. Одним из наиболее значимых результатов, полученных по программе экспериментов СУРА–DEMETER, явилось обнаружение на высотах внешней ионосферы формирования крупномасштабных дактов плотности плазмы, размеры которых поперек геомагнитного поля составляют ~ 100 км [4].

На рис. 1 представлены результаты выполненного 12 мая 2008 г. эксперимента, в котором мощная радиоволна О-поляризации излучалась на частоте 4.3 МГц (при критической частоте F₂-слоя ионосферы $f_{0F_2} = 5.0$ МГц) с $P_{\text{эф}} = 80$ МВт. Высота отражения составляла около 220 км. Луч антенны стен-

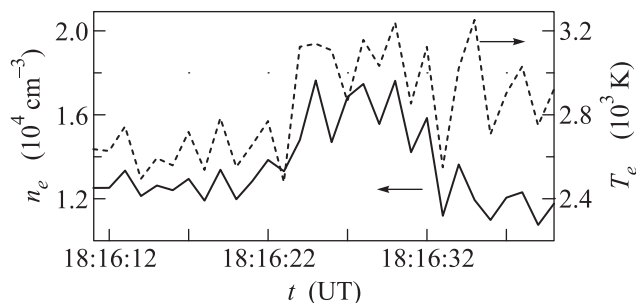


Рис. 1. Неоднородности концентрации плазмы и температуры электронов, зарегистрированные на борту ИСЗ DEMETER в области ионосферного дакта плотности над нагревным стендом СУРА

да был наклонен на 12° на юг в область “магнитного зенита” для волны накачки, где наблюдается развитие наиболее интенсивной искусственной ионосферной турбулентности вблизи высоты отражения волны накачки [9]. Спутник пролетал в $T \simeq 18:16:28$ UT (UT=LT – 4 ч) на высоте 660 км приблизительно в 20 км от центра возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на область с интенсивной искусственной ионосферной турбулентностью. Измерения выполнялись в очень спокойных геомагнитных условиях, когда суммарное суточное значение индекса геомагнитной активности составляло $\Sigma = 6$. На рисунке представлены результаты измерений плотности электронов n_e и их температуры T_e . В интервале времени 18:16:21–18:16:36 UT хорошо прослеживаются увеличение в среднем плотности электронов приблизительно на 40% (формирование дакта плотности плазмы) и сильные вариации ее значений с периодом $T \simeq 2.5$ с (или с пространственным масштабом $L \simeq 17$ км вдоль орбиты ИСЗ приблизительно в направлении С–Ю). В этом сеансе также имеет место также рост средней температуры T_e приблизительно на 15%. Обращает на себя внимание сильная степень корреляции вариаций n_e и T_e : положения их максимумов и минимумов практически полностью совпадают.

На рис. 2 приведены результаты выполненных 18 апреля 2010 г. измерений спектра сигнала СДВ-станции на частоте 18.1 кГц и плотности плазмы в компоненте ионов кислорода O^+ (панели а и б соответственно). Хорошо прослеживается наличие в интервале времени $T = 17:53:50$ – $17:54:07$ UT дакта с увеличенной плотностью плазмы в 17 : 54 : 05 UT и с более слабым повторным максимумом в 17:54:14 UT, а также уширение спектра принимаемого сигнала на частоте 18.1 кГц до ± 50 Гц, как это ранее наблюда-

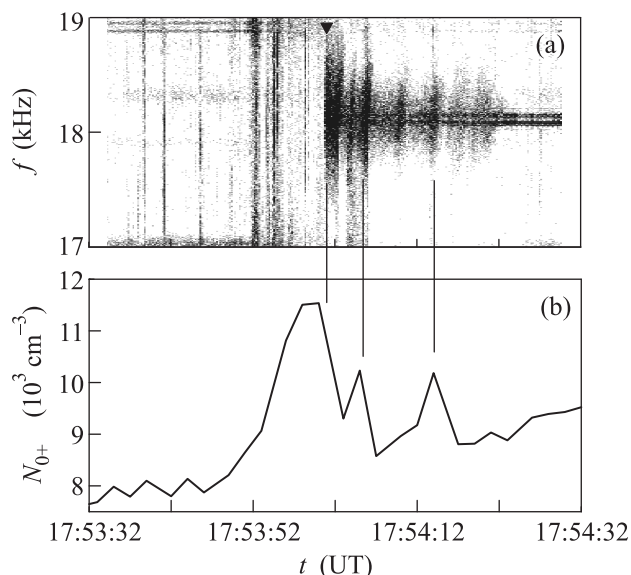


Рис. 2. Результаты синхронных измерений сигнала наземного СДВ-передатчика и возмущений ионосферной плазмы над нагревным стендом СУРА, выполненных на борту ИСЗ DEMETER. (а) – Спектрограмма сигнала наземного СДВ-передатчика с несущей частотой $f \approx 18.1$ кГц. Черным треугольником отмечен момент включения передатчика. (б) – Концентрация ионов (N_{O^+}). Продемонстрирована корреляция всплесков интенсивности и эффектов уширения спектра СДВ-сигнала с максимумами ионной концентрации

лось в [4]. Важно заметить, что это уширение носит пульсирующий характер, максимумы уширения совпадают с максимумами плотности плазмы.

Анализ всех имеющихся экспериментальных данных по пролетам ИСЗ DEMETER над работающим стендом СУРА позволяет заключить, что вариации плотности и температуры плазмы с характерными периодами $T = (2-3)$ с $L = (14-21)$ км регистрировались только в области плазменного дакта. В большинстве случаев они хорошо повторяют друг друга даже в деталях. Однако величина относительных вариаций температуры всегда меньше относительной величины вариаций плотности. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что формируемый во внешней ионосфере плазменный дакт может включать в себя до 10–15 неоднородностей плотности плазмы с размерами поперек геомагнитного поля 15–20 км. Согласно [5] эти неоднородности, в свою очередь, содержат более мелкомасштабные неоднородности с размерами поперек геомагнитного поля от 10 м до 1 км.

3. Модельные лабораторные эксперименты выполнялись на крупномасштабном стенде “Крот” в распадающейся плазме индукционного разряда дли-

ной около 5 м и диаметром 1.5 м. Создаваемый в этой установке столб квазиоднородной замагниченной плазмы позволяет моделировать физические явления, развивающиеся при проведении активных ионосферных экспериментов, в приближении “безграничной” плазмы. В условиях эксперимента концентрация электронов изменялась в пределах $n_e = (10^{11}-10^{12})$ см $^{-3}$. Невозмущенная температура электронов составляла $T_e \sim 0.5$ эВ. Индукция внешнего магнитного поля $B_0 = (50-300)$ Гс. В соответствии с преобразованиями подобия лабораторные эксперименты можно рассматривать как качественное моделирование ионосферных процессов.

Нагрев замагниченной плазмы производился с помощью остеклованной экранированной рамочной антенны диаметром 7 см, к которой подводился радиоимпульс накачки мощностью до 700 Вт и длительностью до 1 мс. Частота накачки составляла $f_0 = (80-160)$ МГц и соответствовала свистовому диапазону частот, $f_0 < f_{ce}$ (f_{ce} – электронная циклотронная частота), в котором в ионосфере возбуждаются и распространяются низкочастотные волны. В таких условиях влияние возникающих при нагреве плазменных неоднородностей на распространение низкочастотных волн оценивалось по изменению пространственной структуры и амплитудно-частотных характеристик излучения на частоте волны накачки. Также модифицированная область плазмы просвечивалась пробными волнами свистового диапазона малой интенсивности ($P \sim 10$ мВт) на частотах $f = (30-50)$ МГц, возбуждавшимися рамочной антенной диаметром 2 см. Пробные волны и излучение на частоте волны накачки регистрировались измерительными рамочными антеннами малого диаметра. Измерения фонового значения и возмущений концентрации плазмы производились модифицированной методикой зонда с СВЧ-резонатором на отрезке двухпроводной линии [10]. Измерения возмущений внешнего магнитного поля в полосе до 1 МГц выполнялись шестивитковым магнитным зондом диаметром 2 см.

Результаты модельных лабораторных экспериментов, проводившихся на стенде “Крот”, представлены на рис. 3 и 4. При локализованном нагреве замагниченной плазмы благодаря термодиффузионным процессам формировался вытянутый дакт с пониженной плотностью аналогично наблюдениям более ранних работ [3, 6]. Его поперечный размер составлял около 10 см и определялся масштабами греющего поля, т.е. диаметром излучающей волну накачки антенны. Новым результатом описываемых экспериментов явилось то, что начиная со зна-

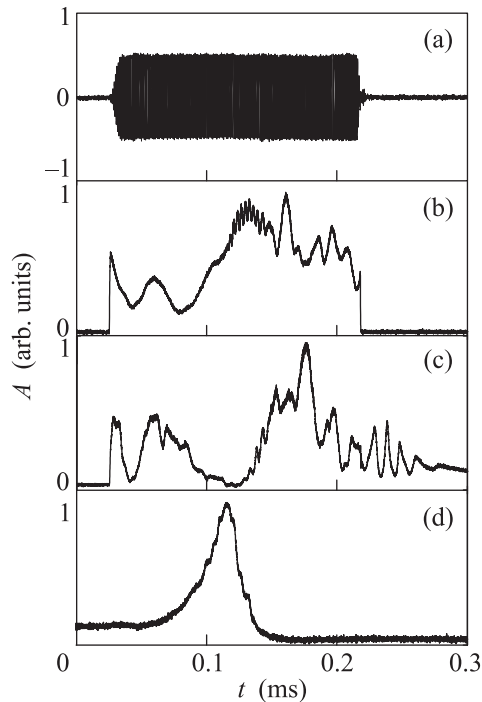


Рис. 3. Результаты модельных лабораторных экспериментов на стенде “Крот”. Концентрация плазмы $n_e = 1.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $B_0 = 100 \text{ Гс}$. (a) – осциллограмма импульса накачки. (b) – Амплитуда волны накачки (частота $f_0 = 80 \text{ МГц}$) в дакте плотности в условиях появления мелкомасштабных неоднородностей. (c) – Амплитуда пробной волны (частота $f = 39 \text{ МГц}$) в дакте плотности с мелкомасштабными неоднородностями. (d) – Амплитуда сигнала с зонда с СВЧ-резонатором на отрезке двухпроводной линии. Видна модуляция сигнала, обусловленная пульсациями плотности, на уровне порядка 10 %

чений мощности, подводимой к нагревной антенне, порядка 200 Вт, в плазме (внутри дакта) за времена порядка 200 мкс развивалась неустойчивость, сопровождавшаяся интенсивными пульсациями плотности на уровне до 10 % с характерными частотами 10–50 кГц (рис. 3). Эффект генерации неоднородностей плотности плазмы имел ярко выраженный пороговый характер. Развитие пульсаций плотности за счет диамагнитного эффекта сопровождалось возмущениями внешнего статического магнитного поля, которые уверенно регистрировались в эксперименте. При появлении возмущений плазмы в дакте наблюдалась глубокая (до 100 %) амплитудная модуляция пробных волн и волны накачки (рис. 3). Исследование уровня модуляции волны накачки в зависимости от параметров плазмы и величины внешнего магнитного поля показывает, что при заданной мощности оптимальные условия для формирования мелко-

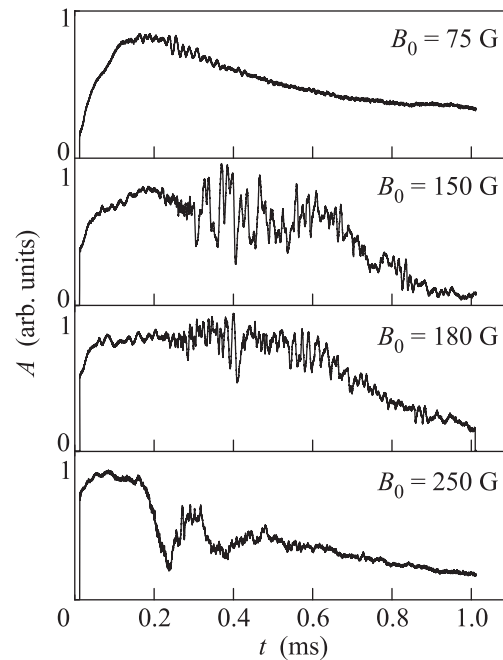


Рис. 4. Амплитуда низкочастотной волны ($f_0 = 160 \text{ МГц}$), распространяющейся в дакте плотности, при различных индукциях внешнего магнитного поля B_0 ; концентрация плазмы $n_e = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$

масштабных неоднородностей реализуются при магнитных полях $B_0 \sim 100 \text{ Гс}$. При малых магнитных полях мелкомасштабные неоднородности не формировались, при высоких отмечалась тенденция к стабилизации неустойчивости (рис. 4). В целом, результаты, полученные в модельном лабораторном эксперименте, воспроизводят эффекты, обнаруженные в ионосфере, включая появление мелкомасштабных структур в дакте плотности и обогащение спектра (амплитудную модуляцию) захваченного в дакт низкочастотного излучения.

4. Кратко обсудим результаты лабораторных и ионосферных экспериментов. Измерения пространственной структуры возмущений плотности, выполняемые зондом с СВЧ-резонатором, сопряжены с трудностями из-за не повторяющихся от одного “выстрела” установки к другому параметров возбуждаемых неоднородностей. Тем не менее они позволяют оценить их поперечный масштаб в 1–2 см, что близко к инерционной электронной длине $c/\omega_{pe} \simeq 1 \text{ см}$ для концентрации плазмы в дакте $n_e \simeq 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Модуляция излучения накачки и пробных низкочастотных волн на неоднородностях с таким характерным масштабом (в ионосфере $c/\omega_{pe} \simeq (10-100) \text{ м}$) соответствует режиму обогащения спектра низкочастотных волн в естественном ионосферном дакте,

который (см. [7]) предположительно наблюдался в активных экспериментах на стенде СУРА и проявлялся как уширение спектра принимаемого сигнала СДВ-станции. Тот факт, что неоднородности концентрации локализуются преимущественно внутри дакта или внутри сильных неоднородностей плотности плазмы с масштабами 15–20 км, где существуют градиенты концентрации плазмы, а также обнаруженная в эксперименте стабилизация неустойчивости при увеличении индукции внешнего магнитного поля (рис. 4) позволяют идентифицировать возмущения плотности как результат развития дрейфовой неустойчивости плазмы на поздних стадиях формирования дакта. Аналогичный режим развития дрейфовой неустойчивости на поперечном градиенте плотности в плазменном дакте предполагался в работе [11]. В настоящей работе существование мелкомасштабных структур плотности доказано как измерениями в лабораторной плазме, так и спутниковыми измерениями на высотах внешней ионосферы.

Как следует из представленных в работе материалов, механизмы нагрева плазмы в лабораторных и ионосферных экспериментах отличаются. В ионосферных экспериментах нагрев плазмы производился на частотах, близких к плазменной частоте, а в лабораторных – на низких частотах свистового диапазона. Однако для развития дрейфовой неустойчивости, приводящей к появлению неоднородностей концентрации, конкретный механизм нагрева плазмы не играет существенной роли. Так, возмущения плотности дрейфового типа регистрировались авторами в лабораторных экспериментах и при высокочастотном воздействии на замагниченную плазму. В них также было обнаружено формирование дактов плотности плазмы при частотах накачки, близких к плазменной частоте [11]. В этих экспериментах, выполненных при относительно невысоком уровне мощности накачки (менее 1 Вт), слабые возмущения концентрации плазмы в дакте были обнаружены с помощью тонких зондовых методов. В настоящей работе за счет увеличения мощности накачки (до сотен Вт) достигнут высокий уровень возмущений плотности, сопоставимый с наблюдаемым в ионосферных экспериментах. Установлено влияние таких неоднородностей на характеристики низкочастотных волн, захваченных в дакт плотности. Последнее представляется очень важным для постановки и интерпретации результатов активных экспериментов в ионосферной плазме.

Таким образом, в результате сопоставления результатов натуральных ионосферных и модельных лабораторных экспериментов установлено, что искус-

ственные дакты плотности, формируемые при высокочастотном нагреве замагниченной плазмы, имеют тонкую структуру. Они содержат более мелкомасштабные неоднородности, развитие которых предположительно обусловлено дрейфовой неустойчивостью плазмы. Такие мелкомасштабные неоднородности плазмы могут приводить к существенному изменению амплитудно-частотных характеристик низкочастотных волн, распространяющихся в дактах. Это важно учитывать при планировании активных экспериментов, а также при попытках организации низкочастотных каналов радиосвязи с использованием искусственных неоднородностей околоземной плазмы. Установление пороговых значений мощности накачки, при которых формируются мелкомасштабные неоднородности, а также детальное исследование пространственной структуры неоднородностей являются предметом дальнейших лабораторных и натуральных исследований.

Авторы выражают благодарность С.Э. Приверу за изготовление радиоэлектронной аппаратуры, использованной при проведении лабораторных экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект # 14-12-00556).

1. J. R. Woodroffe, A. V. Streltsov, A. Vartanyan, and G. M. Milikh, *J. Geophys. Res. A* **118**, 7011 (2013).
2. H. Sugai, M. Maruyama, M. Sato, and S. Takeda, *Phys. Fluids* **21**, 690 (1978).
3. Т. М. Заборонкова, А. В. Костров, А. В. Кудрин, С. В. Тихонов, А. В. Тронин, А. А. Шайкин, *ЖЭТФ* **101**, 1151 (1992).
4. В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Г. П. Комраков, А. С. Белов, Г. А. Марков, М. Парро, Ж. Л. Рош, Е. В. Мишин, *Письма в ЖЭТФ* **88**, 908 (2008).
5. G. M. Milikh, K. Papadopoulos, H. Shroff, C. L. Chang, T. Wallace, E. V. Mishin, M. Parrot, and J. J. Berthelier, *Geophys. Res. Lett.* **35**, L17104 (2008).
6. С. В. Егоров, А. В. Костров, А. В. Тронин, *Письма в ЖЭТФ* **47**, 86 (1988).
7. V. O. Rapoport, V. L. Frolov, S. V. Polyakov, G. P. Komrakov, N. A. Ryzhov, G. A. Markov, A. S. Belov, M. Parrot, and J. L. Rauch, *Geophys. Res. A* **115**, A10322 (2010).
8. В. Ю. Трахтенгерц, Е. Е. Титова, *Геомagnetизм и аэрономия* **25**, 89 (1985).
9. А. В. Гуревич, *УФН* **177**, 1145 (2007).
10. Д. В. Янин, А. В. Костров, А. И. Смирнов, А. В. Стриковский, *ЖТФ* **78**, 133 (2008).
11. М. В. Стародубцев, В. В. Назаров, А. В. Костров, *Изв. вузов. Радиофизика* **52**, 881 (2010).