

Создание дактов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением

В. Л. Фролов¹⁾, В. О. Рапопорт, Г. П. Комраков, А. С. Белов⁺, Г. А. Марков⁺, М. Парро*, Ж. Л. Рош*,
Е. В. Мишин[∇]

Научно-исследовательский радиофизический институт, 603950 Нижний Новгород, Россия

⁺ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

* *Environment Physics and Chemistry Laboratory (LPCE), Orléans, France*

[∇] *Institute for Scientific Research, Boston College, Chestnut Hill, Massachusetts, USA*

Поступила в редакцию 14 августа 2008 г.

После переработки 29 октября 2008 г.

Приводятся результаты измерений характеристик плазменных возмущений на высотах 660 и 840 км, выполненных с помощью бортовой аппаратуры французского искусственного спутника Земли DEMETER и американских спутников серии DMSP при их пролете через магнитную силовую трубку, опирающуюся на область интенсивного воздействия мощным КВ радиоизлучением нагревного стенда Сура на F_2 -слой ионосферы. Экспериментально обнаружено создание искусственных дактов с повышенной плотностью плазмы во внешней ионосфере, измерены характеристики дактов и определены условия их формирования.

PACS: 94.20.—y

Определение возможностей и условий возбуждения на высотах внешней ионосферы и в магнитосфере Земли интенсивных крупномасштабных вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностей плотности плазмы (дактов), играющих роль волноводов для распространения радиоволн очень низких частот (ОНЧ), является важной задачей современных геофизических исследований, решение которой имеет различные области применения. Одним из способов искусственного их формирования, как это, например, было предложено в [1], может быть нагрев ионосферы мощными радиоволнами коротковолнового (КВ) диапазона, когда плазменные возмущения, возбуждаемые вблизи высоты отражения волны накачки (ВН) О-поляризации при ее резонансном взаимодействии с плазмой F_2 -области ионосферы, приводят к генерации искусственной ионосферной турбулентности и, в частности, к образованию магнитоориентированных неоднородностей плотности в широком диапазоне поперечных к геомагнитному полю масштабов от долей метра до десятков километров [2]. Также, резкий рост электронной температуры и давления в области интенсивного нагрева плазмы ведет к формированию бегущей вдоль силовых линий геомагнитного поля “тепловой волны”, после прохождения которой остается вытянутая вдоль поля неоднород-

ность – искусственный дакт. Такой дакт, согласно современным теоретическим моделям [3, 4], должен иметь пониженную плотность. Очевидно, что экспериментальные исследования явлений подобного рода удобнее проводить в спокойных геомагнитных условиях в среднеширотной ионосфере, чем в высокоширотной ионосфере с обычно достаточно высоким и быстро изменяющимся уровнем ее возмущенности. При этом наиболее адекватным методом измерения характеристик таких дактов является использование бортовой аппаратуры искусственных спутников Земли (ИСЗ), летающих на высотах внешней ионосферы.

Спутниковые измерения характеристик плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере при нагреве ее F_2 -области мощным КВ радиоизлучением среднеширотного стенда Сура (ФГНУ НИРФИ, Н. Новгород, Россия), проводились неоднократно, но они носили эпизодический характер и, в большей степени, касались изучения характеристик электромагнитных полей [5, 6]. С 2005 г. с запуском французского микроспутника DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions), несущего на борту различного рода датчики для измерения характеристик плазмы и электромагнитных полей, эксперименты по изучению характеристик плазменных возмущений, возбуждаемых нагревным стендом Сура, приобрели

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

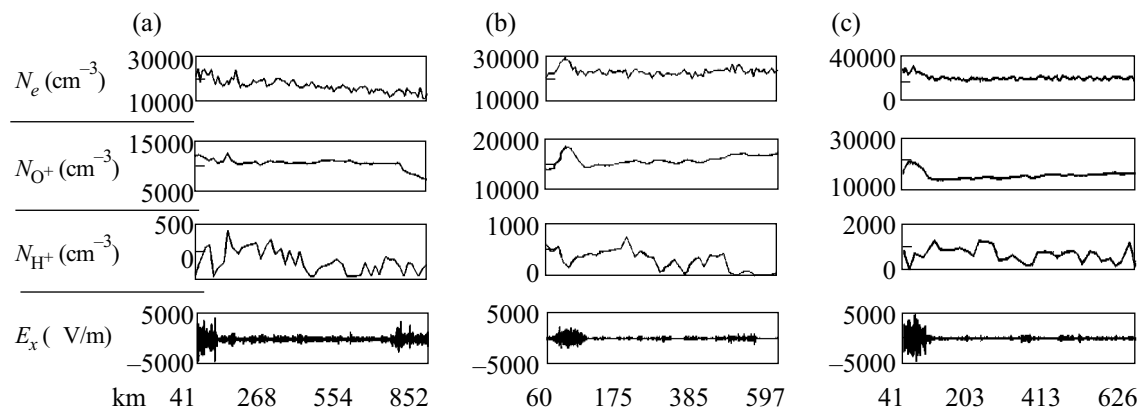


Рис.1. Динамические зависимости для сеансов 30.04.2005 (а), 01.05.2006 (b) и 17.05.2006 (с) плотности электронов N_e , плотности ионов атомарного кислорода N_{O^+} и водорода N_{H^+} . На нижней панели представлены осциллограммы компоненты электрического поля E_x , ортогональной к направлению геомагнитного поля и вектору скорости ИСЗ. По горизонтальной оси отложено расстояние между орбитой ИСЗ и осью возмущенной силовой трубки

регулярный характер и проводились ежегодно в марте – мае и августе – сентябре. Их предварительные результаты опубликованы в работе [7]. Кроме того, в рамках совместных с AFRL (США) экспериментов в августе и октябре 2007 г. такого рода измерения выполнялись с использованием американских спутников серии DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), позволяющих измерять параметры плазмы и потоки высыпающихся электронов и ионов с энергиями 0.03–30 кэВ. Подробное описание характеристик размещенной на спутниках аппаратуры приведено в [8, 9].

При проведении измерений стенд Сура излучал мощную радиоволну в режиме “несущая” в течение 15 мин и включался приблизительно за 10 мин до пролета ИСЗ через центр возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на область с интенсивной искусственной ионосферной турбулентностью, возбуждаемой мощной радиоволной О-поляризации вблизи высоты ее отражения в F_2 -области ионосферы. В большинстве сеансов нагрева ионосферы использовался наклон диаграммы направленности антенны на 12° на юг, что усиливало генерацию искусственной ионосферной турбулентности за счет эффекта “магнитного зенита” [10, 11], поскольку в этом случае ВЧ в области ее резонансного взаимодействия с плазмой распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля и вытянутых вдоль него неоднородностей плотности плазмы.

Ниже представлены результаты спутниковых измерений характеристик плазменных возмущений, возбуждаемых во внешней ионосфере мощным радиоизлучением стенда Сура и регистрируемых бортовой аппаратурой спутников DEMETER и DMSP. Обсуждение полученных результатов, выводы и заключи-

тельные замечания составляют содержание последней части работы.

Результаты измерений с помощью бортовой аппаратуры ИСЗ DEMETER. Имея солнцесинхронную орбиту с высотой 710 км до декабря 2005 г. и 660 км позднее, ИСЗ DEMETER пролетает над стендом Сура (59.1° N, 46.1° E) днем около 8:00 UT и в поздние вечерние часы около 18:30 UT. За три года экспериментов было проведено несколько десятков сеансов нагрева, когда его орбита проходила ближе, чем 200 км, от центра возмущенной силовой трубки. Следует отметить, что измерения, выполненные в дневных условиях, к настоящему времени не дали значимых результатов. В вечерние часы наблюдений искусственные плазменные возмущения были обнаружены в тех сеансах, когда нагрев ионосферы проводился с эффективной мощностью излучения $P_{\text{eff}} \geq 40$ МВт на частоте ВЧ ниже критической частоты F_2 -слоя ионосферы ($f_0 \leq f_{0F2}$) и при условии, что минимальное расстояние между орбитой ИСЗ и осью возмущенной трубки было меньше 100 км. За три года измерений было всего 10 сеансов, удовлетворяющих таким требованиям. Основываясь на данных этих измерений, можно сделать следующие выводы.

1. В трех сеансах было обнаружено присутствие сильных крупномасштабных возмущений с повышенной на 25–35% плотностью плазмы и с размерами вдоль траектории ИСЗ ~ 80 км. Подобные структуры не регистрировались в контрольных сеансах, когда спутник пролетал над неработающим стендом, или когда нагрев ионосферы осуществлялся в условиях низких критических частот, $f_0 > f_{0F2}$ (нагрев на просвет). Примеры регистрации этих плазменных возмущений приведены на рис.1 на трех панелях для

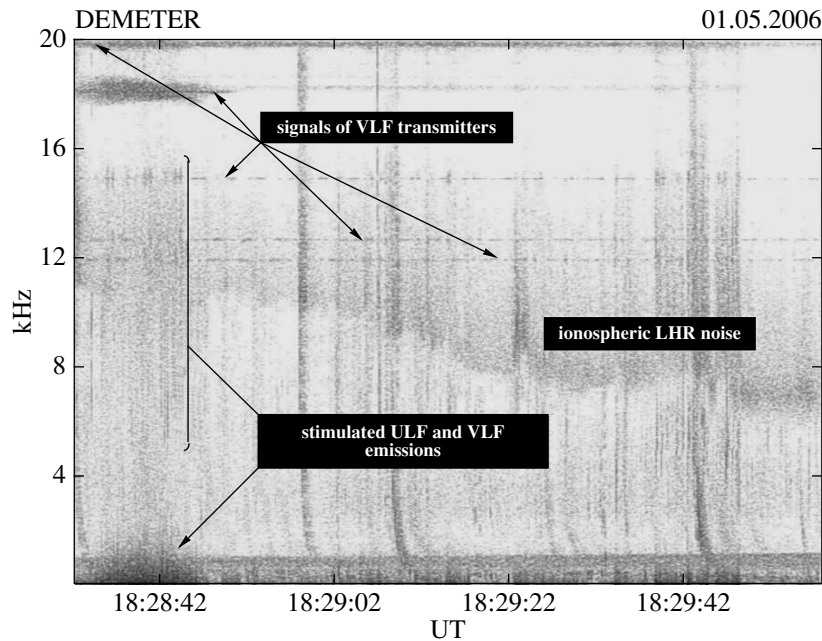


Рис.2. Динамическая спектрограмма компоненты E_x электрического поля для сеанса 01.05.2006. По вертикальной оси отложена частота в килогерцах, по горизонтальной – время. Мощность сигнала кодирована интенсивностью черного цвета (отсутствие сигнала – белый цвет)

сеансов 30.04.2005 ($D = 27$ км; $T = 18 : 25 : 36$ UT), 01.05.2006 ($D = 42$ км; $T = 18 : 28 : 39$ UT) и 17.05.2006 ($D = 39$ км; $T = 18 : 28 : 34$ UT). В скобках после соответствующих дат указаны наименьшее расстояние D между орбитой ИСЗ и осью возмущенной силовой трубки и время T наибольшего сближения. Отметим, что в сеансах 30.04.2005 и 17.05.2006, помимо среднего увеличения плотности плазмы, наблюдаются и сильные флуктуации ее значений с масштабами порядка 25–35 км, а также флуктуации температуры электронов, которые отсутствуют в сеансе 01.05.2006.

2. Во всех случаях, когда имело место формирование возмущений с сильным увеличением плотности плазмы, на ионограммах вертикального зондирования наблюдалось развитие интенсивного F_{spread} , подавление O-моды и появление Z-моды, что свидетельствует о высокой эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой и генерации вблизи уровня отражения ВН интенсивных неоднородностей с размерами поперек геомагнитного поля от ~ 1 м до ~ 10 км.

3. Отличительной чертой возмущений с сильным увеличением плотности плазмы является присутствие в них высокого уровня флуктуаций электромагнитных полей в диапазоне частот от нескольких Гц до десятков кГц, а также наблюдающееся в ряде случаев значительное (на десятки дБ) увеличение интенсивности сигналов от ОНЧ передатчиков и

уширение их частотного спектра. Рис.2 демонстрирует пример спектрограммы, полученной для сеанса 01.05.2006, на которой отчетливо видны отмеченные эффекты: появление интенсивных флуктуаций электрического поля в диапазоне от ~ 10 Гц до ~ 1 кГц, шумов в диапазоне 5–16 кГц, значительное усиление интенсивности сигнала ОНЧ станции на частоте 18.1 кГц и уширение его спектра до ± 500 Гц, тогда как вне крупномасштабной неоднородности плотности плазмы этот сигнал имеет узкий спектр и достаточно слабо различим. Имеются веские основания полагать, что локализация полей внутри такой неоднородности, а также значительное усиление в ней сигнала ОНЧ станции и уширение его спектра связаны с каналированием излучения в дакте плотности, образовавшемся при нагреве ионосферы мощной КВ радиоволной.

4. По результатам измерений было установлено, что избыток плотности ионной компоненты плазмы определяется более тяжелыми ионами O^+ , преобладающими на высотах ~ 700 км, в то время как легкие ионы (H^+ и He^+), как правило, показывают здесь, наоборот, уменьшение своей плотности, которое в процентном отношении к плотности данного сорта ионов может быть сопоставимо или даже выше, чем относительный рост плотности ионов O^+ .

Следует заметить, что включение режима с высокой скоростью оцифровки данных, который использовался в наших экспериментах, было возможно на

спутнике DEMETER только после завершения цикла работы в обзорном режиме. Поэтому оптимальный интервал времени регистрации при пролете ИСЗ вблизи центра возмущенной силовой трубки (скажем, ± 1 мин относительно времени наибольшего сближения) не совпадал с реально установленным временем работы в нужном режиме, что и находит свое отражение в представленных результатах измерений.

Результаты измерений с помощью бортовой аппаратуры ИСЗ DMSP. Спутники серии DMSP также имеют солнцесинхронные орбиты с высотой 840 км и проходят над стендом Сура в утренние часы в интервале 4:00–6:00 UT и в вечерние часы в интервале 13:00–15:00 UT. За два месяца проведения экспериментов было выполнено 8 сеансов нагрева. Из них только в четырех случаях выполнялись условия, когда $f_{0F2} > f_0$, $P_{\text{eff}} \geq 40$ МВт, а ближайшее расстояние между траекторией ИСЗ и центром возмущенной силовой трубкой было меньше 100 км: 2 сеанса – в августе и 2 – в октябре 2007 г. Из них три пролета были в утренние часы и один – в вечернее время. Отметим, что в остальных четырех сеансах, которые не удовлетворяли перечисленным выше требованиям, каких-либо искусственных плазменных возмущений обнаружено не было.

На основании выполненных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. В двух утренних сеансах 23 августа ($D = 46$ км; $T = 05 : 11 : 00$ UT) и 10 октября ($D = 19$ км; $T = 05 : 45 : 00$ UT) было обнаружено присутствие крупномасштабного возмущения с повышенной плотностью плазмы, соответственно, на 2% и 5% и размерами ~ 160 и ~ 130 км вдоль траектории ИСЗ (рис.3). Подобные структуры не регистрировались в контрольных сеансах, когда спутники пролетали над неработающим стендом, или при нагреве ионосферы на просвет.

2. Не было обнаружено каких-либо индуцированных нагревом F_2 -области ионосферы вариаций величины геомагнитного поля или значений скорости дрейфа ионов.

3. В утренних сеансах нагрева, когда обнаруживалось появление сильных крупномасштабных неоднородностей плотности плазмы, на ионограммах наблюдалось частичное подавление O-моды и развитие слабого F_{spread} , свидетельствующие об умеренном уровне развития искусственной ионосферной турбулентности вблизи уровня отражения ВН.

Выводы и заключительные замечания. Путем прямых измерений характеристик ионосферной плазмы во внешней ионосфере Земли на высотах 660 и 840 км с помощью бортовой аппаратуры спутни-

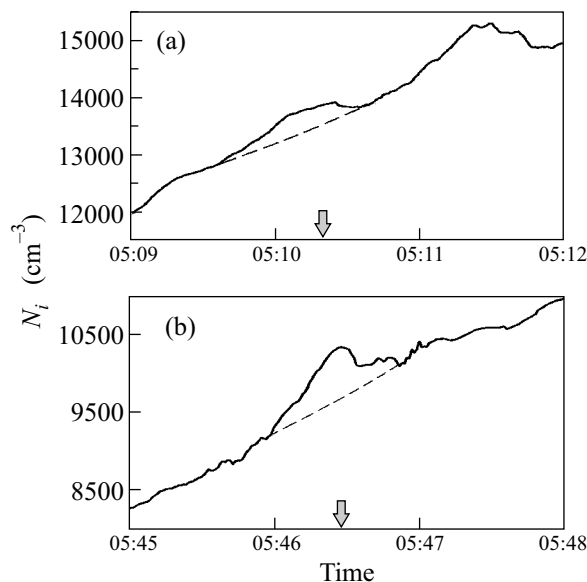


Рис.3. Динамические зависимости для сеансов 23.08.2007 (а) и 10.10.2007 (б) плотности ионов N_i . По горизонтальной оси отложено время, где стрелками указана область наибольшего сближения ИСЗ с осью возмущенной силовой трубки

ков DEMETER и DMSP обнаружено появление крупномасштабных возмущений с сильным увеличением плотности плазмы, связанных с воздействием мощными КВ радиоволнами O-поляризации нагревного стенда Сура на F_2 -область ионосферы, которые могут классифицироваться как дакты плотности. Анализ всей совокупности полученных к настоящему времени данных позволяет определить следующие условия, при которых наблюдалось их создание.

- Формирование дактов имело место при воздействии на ионосферу в утренние или вечерние часы. При этом в поздние вечерние часы по сравнению с утренними вместе с более интенсивной генерацией искусственной ионосферной турбулентности наблюдалось и более сильное увеличение плотности плазмы: 25–35% по сравнению с 2–5%. Нагрев ионосферы в дневное время не дал положительных результатов; проведение измерений в ночных условиях пока было невозможно ввиду низких значений критической частоты f_{0F2} .
- Формирование дактов наблюдалось, только когда нагрев ионосферы осуществлялся с достаточно высокой мощностью ВН $P_{\text{eff}} \geq 40$ МВт.
- Принимая во внимание эффект “магнитного зенита”, в целях усиления генерации искус-

ственной ионосферной турбулентности предпочтительнее использовать для нагрева ионосферы пучок мощных радиоволн, наклоненный в случае среднеширотного стенда Сура на угол $\sim 10\text{--}12^\circ$ на юг для $f_0 \simeq 5$ МГц [11].

- Поскольку поперечный размер дактов составляет ~ 100 км, то их обнаружение возможно только в том случае, если спутник проходит на расстоянии ≤ 50 км от центра возмущенной магнитной силовой трубки.

Невыполнение перечисленных выше условий объясняет отсутствие регистрации сильных крупномасштабных возмущений плотности плазмы практически во всех остальных проведенных сеансах нагрева. Важно также подчеркнуть, что нагрев ионосферы должен осуществляться на частоте ВН f_0 , которая должна быть на $0.5\text{--}1$ МГц ниже критической частоты f_{0F2} . Во всех экспериментах, когда f_0 была близка к f_{0F2} , формирование такого рода возмущений плотности плазмы не наблюдалось. Это может быть следствием просачивания излучаемой мощности за F_2 -слой ионосферы в результате понижения во время нагрева на $10\text{--}20$ % плотности плазмы в его максимуме [2, 12].

Согласно выполненным измерениям, время развития дакта на высотах $660\text{--}840$ км не превышает 10 мин. Это время оказывается короче, чем требуемое время установления концентрации плазмы на этих высотах под действием силы теплового давления, полученное в рамках модельных расчетов [3, 4], и, что более важно, из этих расчетов также следует, что в стационарном состоянии дакт формируется с дефицитом плотности, и только при прохождении “тепловой волны” имеет место временное повышение ее значения по отношению к окружающей плазме. Здесь уместно отметить результаты томографических измерений [12], которые прямо показали существование крупномасштабной неоднородности с увеличенной плотностью плазмы, которая, к тому же, не обязательно лежит на одной силовой линии с образующейся вблизи уровня отражения мощной радиоволны полости с дефицитом плотности плазмы. Следовательно, дакт формируется не только за счет выталкивания плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля из сильно разогретой области, где выделяется основная доля энергии ВН, как это предполагается в упомянутых выше модельных расчетах. Существенным фактором также является то, что формирование дактов в наших экспериментах наблюдалось при отражении мощной радиоволны на высотах $\sim 200\text{--}220$ км, тогда как модельные расчеты пока-

зывают, что формирование дакта следует ожидать только в том случае, если высота отражения ВН будет ≥ 300 км (при меньших высотах ее отражения перенос тепла во внешнюю ионосферу становится мало эффективным из-за сильного уменьшения длины теплопроводности).

К недостаткам предложенных в [3, 4] моделей можно отнести то, что они не учитывают влияния на процессы переноса в плазме выход во внешнюю ионосферу сверхтепловых электронов, ускоренных плазменной турбулентностью в областях резонансного взаимодействия ВН с плазмой, на ускорение которых расходуется до 15% энергии мощной радиоволны [11], а также формирующиеся при нагреве ионосферы направленные движения плазмы [13] с образованием вихрей, которые могут приводить к появлению искусственных неоднородностей плотности плазмы далеко вне области ионосферы, облучаемой мощной радиоволной. Из сказанного выше ясно, что необходимы новые экспериментальные и теоретические усилия для более полного исследования наблюдаемых явлений и построения адекватной экспериментальным данным теоретической модели генерации плазменных возмущений в ионосфере Земли.

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам стенда Сура за помощь в проведении экспериментов. We thank Dr. F. Rich and Dr. G. Wilson for help with DMSP data processing.

Работа проводилась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты # 06-05-64995, # 07-02-00436, # 08-02-00171) и программы “Ведущие научные школы” # НШ-1244.2008.2. E.V. Mishin’s work was supported by the HAARP program under AFRL contract FA8718-08-C0012 with Boston College.

1. В. В. Васьков, Я. С. Димант, Н. А. Рябова и др., Геомагнетизм и аэронавигация **32**, 140 (1992).
2. В. Л. Фролов, Н. В. Бахметьева, В. В. Беликович и др., УФН **177**, 330 (2007).
3. R. P. Perrine, G. M. Milikh, K. Papadopoulos et al., Radio Sci. **41**, RS4002 (2006).
4. В. В. Васьков, Г. П. Комраков, Н. А. Рябова, Геомагнетизм и аэронавигация **35**, 75 (1995).
5. В. М. Костин, Ю. А. Романовский, В. М. Чмырев и др., Космические исследования **31**, 84 (1993).
6. В. В. Васьков, Н. И. Будько, Г. Л. Гдалевич и др., Геомагнетизм и аэронавигация **35**, 98 (1995).
7. В. О. Рапопорт, В. Л. Фролов, Г. П. Комраков и др., Известия ВУЗов. Радиофизика **50**, 709 (2007).

8. Planet. Space Sci. **54**, 409 (2006).
9. F. J. Rich and M. Hairston, J. Geophys. Res. **99**, 3827 (1994).
10. M. Kosch, M. Rietveld, T. Hagfors, and T. Leyser, Geophys. Res. Lett. **27**, 2817 (2000).
11. А. В. Гуревич, К. Р. Зыбин, Х. С. Карлсон, Известия ВУЗов. Радиофизика **48**, 772 (2005).
12. E. D. Tereshchenko, B. Z. Khudukon, A. V. Gurevich et al., Phys. Lett. A **325**, 381 (2004).
13. A. V. Koloskov, T. B. Leyser, Yu. M. Yampolski, and V. S. Beley, J. Geophys. Res. **107**, doi: 10.1029/2001JA000154 (2002).