

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Результаты измерений характеристик искусственных электромагнитных и плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы Земли с помощью ИСЗ DEMETER

В. Л. Фролов^{1,2,a}, В. О. Рапопорт¹, Е. А. Шорохова¹, М. Парро³, Ж.-Л. Рош³

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского.
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, д. 25/12а.

² Казанский (Приволжский) федеральный университет.
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18.

³ Environment Physics and Chemistry Laboratory (LPCE). 45071 Orléans sedex, France.
E-mail: ^a frolov@nirfi.unn.ru

Статья поступила 25.11.2016, подписана в печать 18.04.2017

Представлен обзор результатов, полученных в 2005–2010 гг. во время миссии спутника DEMETER. Анализируются характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцированных во внешней ионосфере Земли при нагреве в F₂-области мощным КВ радиоизлучением среднеширотного нагревного стенда СУРА.

Ключевые слова: ионосфера, стенд СУРА, КВ-нагрев, искусственные ионосферные неоднородности.
УДК: 533.951, 537.868. PACS: 42.62.Cf, 42.30.-d.

Введение

Определение возможностей и условий формирования на высотах внешней ионосферы и в магнитосфере Земли интенсивных вытянутых вдоль линий геомагнитного поля крупномасштабных неоднородностей плотности плазмы (дактов), которые, как это рассматривалось еще в [1], могут служить в качестве каналов для распространения радиоволн очень низкочастотного (ОНЧ) диапазона (вистлеров), является важной задачей современных геофизических исследований. Ее решение имеет различные области применения, включая модификацию магнитосферной плазмы очень низкочастотными — низкочастотными (ОНЧ–НЧ) радиоволнами, распространяющимися в таких дактах. Механизмы формирования дактов в естественной ионосфере рассматривались, например, в [2]; в [3] было показано, что для каналирования вистлеров в дактах необходимо, чтобы плотность плазмы в них была больше, чем в окружающей среде; в [4] исследовались особенности распространения свистовых волн в магнитосферных дактах с повышенной плотностью плазмы.

Одним из способов создания дактов может служить модификация F₂-области ионосферы мощными КВ-радиоволнами O-поляризации, когда вблизи уровня их отражения происходит генерация интенсивной искусственной ионосферной турбулентности, развитие возмущений плотности плазмы различных масштабов от долей метра до десятков километров и сильный разогрев электронов плазмы [5, 5, 7–11]. Возможности создания дактов плотности при модификации ионосферы мощными радиоволнами

теоретически рассматривались в [12–15]. В [16] были приведены результаты наземных и спутниковых экспериментов, которые показали увеличение эффективности ОНЧ-каналов, ответственных за распространение свистящих атмосфериков (вистлеров), при воздействии мощных радиоволн на ионосферу, что связывалось с формированием искусственных дактов плотности плазмы на магнитосферных высотах.

Первые исследования свойств плазменной турбулентности, индуцируемой во внешней ионосфере Земли при модификации F₂-области излучаемыми стендом СУРА (НИРФИ, г. Н. Новгород) мощными радиоволнами O-поляризации, проводились в 1992–1993 гг. с использованием бортовой аппаратуры нескольких искусственных спутников Земли (ИСЗ) [17–20]. Эти исследования позволили установить, что:

1) при воздействии мощными радиоволнами на F₂-слой ионосферы наблюдалось возбуждение волн в ОНЧ- и крайне низкочастотном (КНЧ) диапазонах, которые генерировались и распространялись в возмущенной магнитной силовой трубке диаметром 100–200 км, опирающейся на область с возбуждаемой вблизи высоты отражения волны накачки (ВН) интенсивной искусственной ионосферной турбулентностью;

2) регистрировалось заметное увеличение напряженности электрического поля плазменных шумов во внешней ионосфере в диапазоне от 0.1 до 10 МГц;

3) примерно через 1 мин после начала нагрева происходило возмущение силовой трубки диаметра около 200 км с образованием искусственных неод-

нородностей (дактов) на магнитосферном участке распространения ОНЧ-излучений;

4) имело место формирование или увеличение эффективности ОНЧ-каналов, ответственных за распространение свистящих атмосфериков вдоль силовых линий геомагнитного поля между магнитосопряженными точками; были получены характерные времена развития и релаксации такого канала, составляющие ~ 1 мин и 2–4 мин соответственно.

Однако следует отметить, что эти эксперименты носили единичный характер и, кроме того, эти ИСЗ не были оснащены всем необходимым оборудованием для полного изучения характеристик наблюдаемых явлений.

В настоящей работе мы представляем обзор результатов исследований свойств возбуждаемых во внешней ионосфере искусственных плазменных возмущений, выполненных в 2005–2010 гг. с помощью бортовой аппаратуры французского микро ИСЗ DEMETER, детальное описание которого опубликовано в [21]. Часть результатов измерений, проведенных по программе СУРА–DEMETER, была опубликована в [22–28]. Отметим, что практически все измерения проводились в годы минимума солнечной активности в спокойных или очень спокойных геомагнитных условиях. При этом в 2007–2009 гг. критические частоты были настолько низкими, что за весь годовой период удавалось провести только по несколько успешных сеансов измерений. Необходимо также отметить, что в период с октября по март эксперименты не проводились в силу низких критических частот в ночное время суток. Эксперименты начинались в апреле и заканчивались в сентябре, однако в указанный период в июне и июле они выполнялись только для изучения эффекта генерации низкочастотных радиоволн в ионосфере при нагреве ее мощными модулированными по амплитуде КВ (короткие волны) радиоволнами (эффект Гетманцева) [29], поскольку в эти месяцы была высокая вероятность появления мощных спорадических слоев E_s , экранирующих F_2 -область ионосферы и препятствующих проведению экспериментов по модификации верхней ионосферы мощными радиоволнами.

Одним из наиболее значимых результатов, полученных в рамках программы СУРА–DEMETER, является обнаружение формирования на высотах внешней ионосферы дактов с увеличенной плотностью плазмы с размерами поперек линий геомагнитного поля около ~ 100 км [22–24]. Детальное рассмотрение характеристик этих дактов и условий их образования с учетом всех полученных с помощью ИСЗ DEMETER экспериментальных данных является основной целью настоящей работы. Кроме того, в работе на основе результатов выполненных экспериментов продемонстрировано влияние таких дактов на локальные ионосферно-магнитосферные связи и на распространение радиоволн различных диапазонов.

1. Характеристики стенда СУРА и бортовой аппаратуры ИСЗ DEMETER

Нагревный стенд СУРА (ФГБНУ НИРФИ, г. Н. Новгород, Россия), расположен в 120 км к востоку от г. Н. Новгород; его координаты: 56.15° с.ш., 46.1° в.д. Стенд имеет трехмодульную структуру. Каждый модуль состоит из радиопередатчика ПКВ-250, генерирующего ВЧ (высокочастотную) мощность до 250 кВт, который нагружен на свою антенную решетку, состоящую из 12×4 широкополосных скрещенных диполей и вытянутую в восточно-западном направлении. Стенд может излучать волны O - или X -поляризации в диапазоне частот от 4.3 до 9.5 МГц. Модули стенда могут работать независимо, объединяться в режиме когерентного излучения по два или все три вместе. В последнем случае решетка состоит из 144 диполей, занимающих площадь $300 \text{ м} \times 300 \text{ м}$. Максимальная эффективная мощность излучения стенда при этом составляет ~ 80 МВт на частотах волны накачки $f_{\text{ВН}} \approx 4300$ кГц и ~ 280 МВт на частотах $f_{\text{ВН}} \approx 9300$ кГц, увеличиваясь с ростом $f_{\text{ВН}}$. Диаграмма направленности антенны стенда в плоскости магнитного меридиана может отклоняться от вертикали в пределах $\pm 45^\circ$. Для увеличения эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой за счет эффекта «магнитного зенита» [9, 30] в большинстве случаев использовалась модификация ионосферы не вертикальным пучком мощных радиоволн, а наклоненным на 12° от вертикали на юг. Как показано в [31], в этом случае для стенда СУРА наблюдается наиболее сильный разогрев плазмы и усиление генерации искусственных ионосферных неоднородностей всех масштабов от метров до десятков километров. При таком наклоне координаты центра пятна засвеченной мощными радиоволнами ионосферы составляют на высоте 250 км $\varphi = 55.7^\circ$ с.ш. и $\lambda = 46^\circ$ в.д.; само пятно при $f_{\text{ВН}} \approx 4300$ кГц имеет здесь диаметр ~ 60 км по уровню $0.5 P_{\text{max}}$.

Стенд СУРА на сегодня единственная в мире действующая установка, расположенная в средних широтах, где сильные естественные геомагнитные возмущения — достаточно редкие события. Этим он отличается от стендов EISCAT-heating (Тромсе, Сев. Норвегия) и HAARP (Аляска, США), расположенных в авроральных широтах, в которых прогнозируемые сильные естественные возмущения в ионосфере и магнитосфере Земли значительно затрудняют проведение экспериментов и усложняют интерпретацию наблюдаемых явлений.

Спутник DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) был запущен в июне 2004 г. на круговую солнечно-синхронную полярную орбиту с наклоном 98.3° и высотой ~ 710 км; в декабре 2005 г. высота его орбиты была понижена до ~ 660 км. Над стендом СУРА спутник пролетал в 18:00–

18:30 UT в условиях ночной ионосферы и около 07:30–08:00 UT в дневных условиях. Он обладал широким набором бортовой аппаратуры, которая обеспечивала в непрерывном режиме измерение основных плазменных параметров, электромагнитных полей и потоков энергичных электронов. В ее состав входили и использовались в наших измерениях:

1) зонд Ленгмюра (Instrument Sound de Langmuir, ISL) [32], предназначенный для измерения температуры и плотности электронов и плотности ионов (без разделения ионов на составляющие), а также потенциала корпуса спутника;

2) анализатор плазмы (Instrument d'Analyse du Plasma, IAP) [33], предназначенный для измерения характеристик популяции тепловых ионов, включая измерения концентрации и температуры ионов H^+ , He^+ и O^+ , вектора скорости суммарного потока ионов;

3) измеритель электрического поля (Instrument Champ Electrique, ICE) [34], позволяющий проводить измерения его напряженности в диапазоне частот 0–3.175 МГц;

4) измеритель магнитного поля (Magnetic Field Experiment, IMSC) [35], позволяющий проводить измерения его напряженности в диапазоне частот от 10 Гц до 20 кГц;

5) детектор высокоэнергичных электронов (IDP spectrometer) [36], предназначенный для измерения интенсивности потока электронов с энергиями от 70 кэВ до 2.5 МэВ.

Аппаратура спутника могла работать в режимах низкоскоростного (*survey mode*) и высокоскоростного (*burst mode*) съема данных. Заметим, что в режиме *burst mode*, который в основном и использовался в наших измерениях, осуществлялось наиболее полное включение бортовой аппаратуры спутника и проводилась регистрация всех 6 компонент электромагнитного поля в диапазоне до 1.2 кГц. Для ночных сеансов, которые только и анализируются в настоящей работе, орбита ИСЗ на широте станда СУРА проходила приблизительно с юга на север.

2. Результаты измерений

2.1. Организация измерений, итоговая таблица их результатов

При проведении измерений для создания искусственных плазменных возмущений в ионосфере Земли станд СУРА включался на ~ 15 мин за ~ 10 –13 мин до пролета ИСЗ над стандом. Это время, согласно [7, 10, 17–20], является достаточным для развития искусственной ионосферной турбулентности до практически стационарного уровня не только в области отражения ВН, но и на высотах внешней ионосферы. В случае когда ИСЗ находился в магнитосопряженной к станду области ионосферы, длительность излучения мощной радиоволны в измерениях 2010 г. была увеличена до 40 мин, чтобы обеспечить более полное возбуждение плазменных возмущений во всей магнитной силовой трубке.

Следует отметить, что эксперименты, выполненные в дневных условиях, не привели к обнаружению дактов или каких-либо иных плазменных возмущений. Это связано с тем, что в дневной ионосфере совместное влияние более высокого уровня поглощения радиоволн в нижней ионосфере (в ее *D*- и *E*-слоях) и дефокусировки радиоволн на дефокусирующей линзе, образующейся на высотах 130–180 км, вызывает ослабление более чем на 20 дБ интенсивности потока излучения мощной радиоволны на уровне F_2 -области по сравнению со случаем ее распространения в свободном пространстве. Кроме того, дневная ионосфера характеризуется более высоким уровнем фотоэлектронов, что приводит к более сильному затуханию плазменных волн, более низкой высотой максимума F_2 -слоя ионосферы и более высокой концентрацией в нем плазмы и нейтральных частиц. Все эти факторы в своей совокупности приводят к значительному уменьшению эффективности взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой (а следовательно, и к генерации существенно более слабой искусственной ионосферной турбулентности) при модификации дневной ионосферы по сравнению с нагревом плазмы в вечерних и ночных условиях [5, 31].

Всего по программе СУРА–DEMETER в 2005–2010 гг. было выполнено около 200 экспериментов. Не было зарегистрировано каких-либо искусственных плазменных возмущений, когда частота мощной радиоволны превышала критическую частоту f_{oF_2} слоя F_2 ионосферы либо когда эффективная мощность излучения волны накачки была ниже 40 МВт, а также когда орбита ИСЗ проходила на расстоянии больше 100 км от центра возмущенной магнитной силовой трубки. Следует также отметить, что ни разу не был зарегистрирован низкочастотный сигнал, отвечающий частоте амплитудной модуляции мощной радиоволны и генерируемый вследствие эффекта Гетманцева [29]. Не были зарегистрированы также какие-либо значимые плазменные или электромагнитные возмущения в магнитосопряженной к станду СУРА области ионосферы.

С учетом вышесказанного в таблице представлены только те сеансы, когда нагрев ионосферы проводился в вечерние часы при $f_{ВН} \leq f_{oF_2}$ и с эффективной мощностью излучения $P_{\text{eff}} \geq 40$ МВт при условии, что минимальное расстояние между орбитой ИСЗ и центром возмущенной магнитной силовой трубки не превышало 100 км. За 6 лет измерений набралось всего 25 сеансов, удовлетворяющих таким требованиям. В таблицу дополнительно включены еще 3 сеанса (№ 4, 26 и 28), когда $f_{ВН} > f_{oF_2}$ (нагрев на просвет), которые привлекались для анализа результатов измерений прохождения мощной радиоволны во внешнюю ионосферу. Заметим, что все времена в таблице даны в UT; для приведенных сеансов измерений $T_{\text{UT}} = T_{\text{МСК}} - 4$ ч ($T_{\text{МСК}} \approx T_{\text{ЛТ}}$).

Итоги экспериментов

№	Год	Дата, время T^* (УТ), расстояние D^*	Время нагрева (УТ), частота ВН, мощность ВН, наклон ДН	f_{0F2} $f_{гор}$ ΣK_p	Характеристики дакта: δN_{max} (по показаниям ионного датчика O^+), время регистрации дакта, время максимума плотности в дакте	Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений: а) наличие вариаций N_e, N_i, T_e, T_i, V_i ; б) регистрация индуцированных нагревом КНЧ-ОНЧ E и H полей; в) регистрация электрического поля на боковой частоте ВН; г) наличие уширения спектра СДВ-сигналов в дакте
1	2005	30.04.2005 $T^* = 18:25:36$ $D^* = 26$ км	18:15–18:30 4600 кГц 100 МВт 12° на юг	5.2 МГц 287 км $\Sigma K_p = 30^-$	Дакт: $\delta N = 33\%$ (14%), $T = 18:25:32-18:25:43$ $T_{max} = 18:25:38$	Есть вариации N_e, N_i, T_e, V_i Усиление E -полей в дакте в полосе до 2–4 кГц Есть излучение на $f_{бок} = 2066$ кГц Уширение спектра СДВ-сигнала на $F = 19.8$ кГц
2		25.05.2005 $T^* = 18:19:54$ $D^* = 67$ км	18:09–18:34 5828 кГц 150 МВт вертикально	6.6 МГц 246 км $\Sigma K_p = 7$	Дакт не обнаруживается	Слабые вариации N_i и V_z Излучение на $f_{бок} = 838$ кГц
3		13.08.2005 $T^* = 18:20:43$ $D^* = 40$ км	18:10–18:25 4300 кГц 40 МВт вертикально	4.4 МГц 268 км $\Sigma K_p = 23$	Дакт не обнаруживается	Вариации N_e, N_i , южнее центра диаграммы направленности
4		05.09.2005 $T^* = 18:26:41$ $D^* = 73$ км	18:16–18:31 4300 кГц 80 МВт вертикально	3.6 МГц — $\Sigma K_p = 20^+$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено Излучение на $f_{бок} = 2366$ кГц
5	2006	18.04.2006 $T^* = 18:22:59$ $D^* = 5$ км	18:12–18:27 4300 кГц 80 МВт вертикально	4.4–3.9 МГц 240 км $\Sigma K_p = 12$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено Излучение на $f_{бок} = 2366$ кГц
6		01.05.2006 $T^* = 18:28:39$ $D^* = 35$ км	18:18–18:33 4300 кГц 80 МВт 12° на юг	5.8 МГц 230 км $\Sigma K_p = 2^+$	Дакт: $\delta N = 27\%$ (31%), $T = 18:28:40-18:28:49$ $T_{max} = 18:28:44$	Изменение значений N_e, N_i, T_e, T_i . Усиление E -полей в дакте в полосе 0–2 кГц и в полосе 6–16 кГц Уширение спектра СДВ-сигналов на частотах $F = 19.8, 18.1$ и 14.8 кГц
7		04.05.2006 $T^* = 18:22:34$ $D^* = 65$ км	18:12–18:27 4300 кГц 80 МВт 12° на юг	5.3 МГц 240 км $\Sigma K_p = 20$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено

Итоги экспериментов (продолжение)

№	Год	Дата, время T^* (УТ), расстояние D^*	Время нагрева (УТ), частота ВН, мощность ВН, наклон ДН	f_{0r2} $f_{\text{отгр}}$ ΣK_p	Характеристики дакта: δN_{max} (по показаниям ионного датчика O^+), время регистрации дакта, время максимума плотности в дакте	Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений: а) наличие вариаций N_e , N_i , T_e , T_i , V_i ; б) регистрация индуцированных нагревом КНЧ-ОНЧ E и H полей; в) регистрация электрического поля на боковой частоте ВН; г) наличие уширения спектра СДВ-сигналов в дакте
8	2006	17.05.2006 $T^* = 18:28:34$ $D^* = 39$ км	18:18–18:33 4785 кГц 120 МВт 12° на юг	5.9 МГц 220 км $\Sigma K_p = 10$	Дакт: $\delta N = 27\%$ (56%), $T = 18:28:31 - 18:28:42$ $T_{\text{max}} = 18:28:36$	Вариации N_e , N_i , T_e , T_i , V_i Усиление E -полей в дакте в полосе до 2–4 кГц Уширение спектра СДВ-сигналов на $F = 19.8, 18.1$ и 14.8 кГц
9		20.05.2006 $T^* = 18:22:31$ $D^* = 68$ км	18:12–18:27 5455 кГц 150 МВт 12° на юг	5.7 МГц 225 км $\Sigma K_p = 12^-$	Дакт не обнаруживается	Вариации N_e и T_e Усиление E -полей в полосе до 2 кГц Излучение на $f_{\text{бок}} = 1211$ кГц Уширение спектра СДВ-сигналов на $F = 19.8, 18.1$ и 14.8 кГц
10		24.08.2006 $T^* = 18:22:26$ $D^* = 55$ км	18:12–18:27 4300 кГц 80 МВт 12° на юг	4.5 МГц 245 км $\Sigma K_p = 9$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено Излучение на $f_{\text{бок}} = 2366$ кГц
11	2007	05.04.2007 $T^* = 18:22:30$ $D^* = 43$ км	18:12–18:27 5480 кГц 150 МВт 12° на юг	5.5 МГц — $\Sigma K_p = 7$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено Излучения на $f_{\text{бок}} = 1186$ кГц
12		07.05.2007 $T^* = 18:22:38$ $D^* = 34$ км	18:16–18:26 4785 кГц 120 МВт 12° на юг	≤ 4.6 МГц 270 км $\Sigma K_p = 21^+$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено Излучение на $f_{\text{бок}} = 1881$ кГц
13		24.08.2007 $T^* = 18:29:42$ $D^* = 125$ км	18:19–18:34 4300 кГц 80 МВт 12° на юг	4.7 МГц 240 км $\Sigma K_p = 2$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено Излучение на $f_{\text{бок}} = 2366$ кГц
14		30.08.2007 $T^* = 18:17:41$ $D^* = 64$ км	18:13–18:28 4300 кГц 80 МВт 12° на юг	4.3 МГц 260 км $\Sigma K_p = 8^+$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено Излучение на $f_{\text{бок}} = 2366$ кГц
15	2008	12.05.2008 $T^* = 18:16:28$ $D^* = 21$ км	18:05–18:20 4300 кГц 80 МВт 12° на юг	5.0 МГц 220 км $\Sigma K_p = 6^-$	Дакт: $\delta N = 42\%$ (73%), $T = 18:16:21 - 18:16:36$ $T_{\text{max}} = 18:16:29$	Вариации N_e , N_i , T_e , V_i Усиление E -полей в полосе до 1 кГц и более слабое усиление в полосе до > 20 кГц; усиление H -полей в полосе до 500 Гц Излучение на $f_{\text{бок}} = 2366$ кГц Увеличение энергии и потока энергичных электронов в дакте Уширение спектра СДВ-сигналов на $F = 19.8$ кГц

Итоги экспериментов (продолжение)

№	Год	Дата, время T^* (УТ), расстояние D^*	Время нагрева (УТ), частота ВН, мощность ВН, наклон ДН	f_{0F2} $f_{гор}$ ΣK_p	Характеристики дакта: δN_{max} (по показаниям ионного датчика O^+), время регистрации дакта, время максимума плотности в дакте	Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений: а) наличие вариаций N_e, N_i, T_e, T_i, V_i ; б) регистрация индуцированных нагревом КНЧ-ОНЧ E и H полей; в) регистрация электрического поля на боковой частоте ВН; г) наличие уширения спектра СДВ-сигналов в дакте
16	2008	28.05.2008 $T^* = 18:16:28$ $D^* = 40$ км	18:00–18:21 4300 кГц 80 МВт 12° на юг	4.7 МГц 240 км $\Sigma K_p = 19$	Дакт: $\delta N = 42\%$ (25%), $T = 18:16:27-18:16:39$ $T_{max} = 18:16:33$	Вариации N_e, N_i, T_e, V_i Усиление E -полей в полосе до 460 Гц и более слабое усиление в полосе до 18 кГц; усиление H -полей в полосе до 200 Гц и более слабое усиление в полосе до 500 Гц Излучение на $f_{бок} = 2366$ кГц Увеличение энергии и потока энергичных электронов в дакте
17		31.05.2008 $T^* = 18:10:30$ $D^* = 88$ км	17:55–18:15 4300 кГц 80 МВт 12° на юг	4.6 МГц 236 км $\Sigma K_p = 17^-$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено Излучение на $f_{бок} = 2366$ кГц
18	2009	27.08.2009 $T^* = 18:03:47$ $D^* = 39$ км	17:53–18:08 4300 кГц 40 МВт вертикально	4.3 МГц 270 км $\Sigma K_p = 11$	Дакт: $\delta N = 15\%$ (77%), $T = 18:03:36-18:03:53$ $T_{max} = 18:03:43$	Вариации N_e, N_i, T_e, T_i, V_i Усиление E -полей в полосе до 200 Гц и более слабое усиление в полосе до 1 кГц Излучение на $f_{бок} = 2366$ кГц Уширение спектра СДВ-сигналов на $F = 14.8$ кГц
19	2010	18.04.2010 $T^* = 17:54:03$ $D^* = 25$ км	17:25–17:55 4300 кГц 40 МВт 12° на юг	4.7 МГц 260 км $\Sigma K_p = 5^-$	Двойной дакт: $\delta N_1 = 18\%$ (35%), $T = 17:53:52-17:54:09$ $T_{max1} = 17:54:01$ $\delta N_2 = 7\%$ (13%), $T = 17:54:09-17:54:20$ $T_{max2} = 17:54:15$	Вариации N_e, N_i, T_e, T_i, V_i Усиление E -полей в полосе до 2–4 кГц Излучение на $f_{бок} = 2366$ кГц Уширение спектра СДВ-сигнала на $F = 18.1$ кГц
20		28.04.2010 $T^* = 18:01:13$ $D^* = 105$ км	17:15–17:55 4300 кГц 50 МВт 12° на юг	5.7 МГц 225 км $\Sigma K_p = 6^+$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено
21		14.05.2010 $T^* = 17:53:13$ $D^* = 28$ км	17:40–17:52:30 4785 кГц 90 МВт 12° на юг	6.0 МГц 235 км $\Sigma K_p = 5^-$	Дакт: $\delta N = 14\%$ (24%), $T = 17:53:02-17:53:12$ (южнее центра возмущенной трубки) $T_{max} = 17:53:07$	Вариации N_e, N_i, T_e, V_i Усиление E -полей в полосе до 400 Гц Уширение спектра СДВ-сигналов на $F = 18.1$ и 19.8 кГц

Итоги экспериментов (окончание)

№	Год	Дата, время T^* (UT), расстояние D^*	Время нагрева (UT), частота ВН, мощность ВН, наклон ДН	f_{0r2} $f_{отр}$ ΣK_p	Характеристики дакта: δN_{max} (по показаниям ионного датчика O^+), время регистрации дакта, время максимума плотности в дакте	Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений: а) наличие вариаций N_e, N_i, T_e, T_i, V_i ; б) регистрация индуцированных нагревом КНЧ-ОНЧ E и H полей; в) регистрация электрического поля на боковой частоте ВН; г) наличие уширения спектра СДВ-сигналов в дакте
22	2010	24.05.2010 $T^* = 18:00:20$ $D^* = 102$ км	17:50–17:58 4785 кГц 70 МВт 12° юг	5.8 МГц 250 км $\Sigma K_p = 2$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено
23		27.05.2010 $T^* = 17:52:42$ $D^* = 27$ км	17:35–17:50 4785 кГц 70 МВт 12° на юг	5.3 МГц 250 км $\Sigma K_p = 4$	Дакт: $\delta N = 22\%$ (17%), $T = 17:52:34-17:52:42$ $T_{max} = 17:52:36$	Вариации N_e, N_i, T_e, V_i Усиление E -полей в полосе до 2 кГц Излучение на $f_{бок} = 1881$ кГц Уширение спектра СДВ-сигналов на $F = 19.8$ кГц
24		19.06.2010 $T^* = 17:58:56$ $D^* = 95$ км	17:39–17:59 4300 кГц 40 МВт 12° на юг	5.1 МГц 250 км $\Sigma K_p = 5^+$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено Естественное противозональное изменение N_{H+} и N_{O+}
25		22.06.2010 $T^* = 17:51:15$ $D^* = 37$ км	17:31–17:51 4785 кГц 40 МВт 12° юг	5.6 МГц 245 км $\Sigma K_p = 9$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено Естественное противозональное изменение N_{H+} и N_{O+}
26		18.09.2010 $T^* = 17:51:44$ $D^* = 27$ км	16:20–17:52 4300 кГц 50 МВт 12° на юг	3.7–3.9 МГц (в конце сеанса) — $\Sigma K_p = 8^+$	Дакт: $\delta N = 10\%$ (15%), $T = 17:51:30-17:51:55$ (с небольшим провалом посередине) $T_{max} = 17:51:37$	Вариации N_e, N_i, T_e, V_i Усиление E -полей в полосе до 1.0 кГц и с более слабым усилением в полосе 12–16 кГц Излучение на $f_{бок} = 2366$ кГц Уширение спектра СДВ-сигналов на $F = 16.4, 18.1$ и 19.8 кГц
27		21.09.2010 $T^* = 17:43:59$ $D^* = 105$ км	17:19–17:45 4740 кГц 105 МВт 12° на юг	5.2 МГц 225 км $\Sigma K_p = 8^+$	Дакт не обнаруживается	Плазменных возмущений не обнаружено Усиление E -полей в полосе до 0.4 кГц Излучение на $f_{бок} = 1926$ кГц Усиление потока энергичных частиц Наклонные спектры СДВ-станций на $F = 18.1$ кГц
28		01.10.2010 $T^* = 17:50:27$ $D^* = 15$ км	17:20–17:52 4785 кГц 80 МВт 12° на юг	3.7 МГц — $\Sigma K_p = 2^+$	Дакт (с уменьшенной плотностью плазмы): $\delta N_e = -13\%$, $T = 17:50:32-17:50:49$ $T_{max} = 17:53:07$	Плазменных возмущений не обнаружено Усиление E -полей в полосе до 1 кГц (но раньше дакта, где усиление сигнала на боковой частоте ВН; здесь же уширение спектра СДВ-сигналов) Излучение на $f_{бок} = 1881$ кГц Наклонные спектры СДВ-станций на $F = 16.4$ и 18.1 кГц

В первом столбце таблицы указан номер сеанса; во втором приведены дата проведения измерений, время, когда спутник был на минимальном расстоянии от центра возмущенной магнитной силовой трубки (T^*) и минимальное расстояние до ее центра (D^*); в третьем — время излучения волны накачки, частота и эффективная мощность ее излучения, а также наклон диаграммы направленности излучающей антенны станда. В четвертом столбце представлены сведения об условиях проведения измерений, указаны значения критической частоты f_{0F2} , высоты отражения волны накачки и суммарного за сутки K_p -индекса (ΣK_p) в день измерений. Поскольку для всех сеансов таблицы значения $\Sigma K_p \leq 30$, причем в большинстве случаев $\Sigma K_p < 20$, можно считать, что измерения выполнялись в спокойных или очень спокойных геомагнитных условиях. В пятом столбце, когда регистрировался дакт плотности плазмы на высоте орбиты ИСЗ, приведены: максимальное изменение плотности плазмы в дакте δN_{\max} относительно плотности окружающей плазмы, время его регистрации и время, когда изменение плотности плазмы в нем было максимальным. Увеличение плотности плазмы в дакте определялось по показаниям ленгмюровского зонда (ISL) для его электронной компоненты N_e и по показаниям ионного датчика IAP для компоненты ионов кислорода N_{O+} , которые являются доминирующими на высотах ~ 700 км (увеличение плотности для N_{O+} в таблице приведены в скобках). Из таблицы видно, что значения для увеличения N_{O+} в дакте могут до 2 раз превышать соответствующие значения N_e . Согласно консультациям с разработчиками ИСЗ и конкретно прибора ISL, более точными следует считать данные измерений для N_e , поскольку на результаты измерений с помощью ионного датчика сильное влияние может оказывать потенциал корпуса спутника. В последней шестой колонке отмечено, какие параметры электромагнитных и плазменных возмущений регистрировались при модификации ионосферы мощным радиоизлучением. В этой же колонке отмечена регистрация отклика сигнала волны накачки на одной из боковых частот его спектрального преобразования. Это связано с тем, что для используемых на стенде СУРА частот $f_{\text{ВН}} \geq 4.3$ МГц сигнал волны накачки не мог быть прямо измерен ввиду ограниченности полосы пропускания измерителя ICE (~ 3.175 МГц). Однако в спектре принимаемого оцифрованного сигнала присутствует сигнал на боковой частоте $f_{\text{бок}} = 6666$ кГц — $f_{\text{ВН}}$, характеристики которого в определенной мере отражают характеристики сигнала на частоте волны накачки (здесь частота 6666 кГц — частота оцифровки измерителя напряженности электрического поля ICE) [27, 34]. Например, при $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц в спектре регистрируемого излучения появляется сигнал на частоте $6666 - 4300 = 2366$ кГц, которая уже попадает в полосу анализа прибора ICE. В таблице

приведен логарифм нормированной интенсивности электрического поля на боковой частоте $J = \log I^*$ ($I^* = I/1$ мкВ²·м⁻²·Гц⁻¹), интервал времени регистрации сигнала, когда его интенсивность была выше уровня шумов, и время, когда он имел максимальную интенсивность. В шестой колонке также отмечается наличие эффекта уширения спектра сигналов СДВ-радиостанций внутри дакта и указаны частоты этих станций.

2.2. Примеры выполненных измерений

Результаты исследований свойств дактов плотности плазмы были частично опубликованы в [22–24]. Как следует из таблицы, за все время проведения измерений они были зарегистрированы только в 11 сеансах (№ 1, 6, 8, 9, 15, 16, 18, 19, 21, 23, 26), причем всегда с повышенной плотностью плазмы. Подобные структуры не обнаруживались в контрольных сеансах, когда спутник пролетал над неработающим стендом или когда нагрев ионосферы осуществлялся в режиме «на просвет» при $f_{\text{ВН}} > f_{0F2}$.

В качестве примеров рассмотрим результаты измерений для трех сеансов, выполненных 1 мая 2006 г. (сеанс № 6), 12 мая 2008 г. (сеанс № 15) и 18 апреля 2010 г. (сеанс № 19). Сеансы были подобраны таким образом, чтобы дать наиболее полное представление о характере искусственных плазменных и электромагнитных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы при модификации ночного среднеширотного F_2 -слоя мощными КВ-радиоволнами O -поляризации.

1 мая 2006 г.

В этом сеансе мощная радиоволна излучалась с 18:18 до 18:33 UT на частоте $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц ($f_{0F2} \approx 5.8$ МГц) с $P_{\text{эф}} = 80$ МВт с наклоном диаграммы направленности на 12° на юг; высота отражения волны накачки была ~ 230 км. Следовательно, модификация ионосферы осуществлялась в условиях, когда значение $f_{\text{ВН}}$ было на 1.5 МГц ниже f_{0F2} . Измерения выполнялись в очень спокойных геомагнитных условиях: $\Sigma K_p = 2^+$. Минимальное расстояние между орбитой ИСЗ и центром возмущенной магнитной силовой трубки составляло 35 км для $T^* = 18:28:39$ UT.

На рис. 1 в левом столбце показано изменение концентрации электронов N_e (вверху), а также ионов кислорода N_{O+} (средняя панель) и водорода N_{H+} (нижняя панель). В правом столбце сверху вниз приведены измерения температуры электронов T_e , температуры ионов T_i и компоненты скорости ионов V_z , направленной в противоположном к вектору скорости ИСЗ направлению. Для обоих столбцов внизу под осью абсцисс показаны координаты орбиты ИСЗ и время (в UT), когда он в них находился. По результатам измерений N_e и N_{O+} видно формирование дакта с увеличенной плотностью плазмы на $\sim 25\%$ (по данным ленгмюровского зонда ISL) и на $\sim 27\%$ (по данным ион-

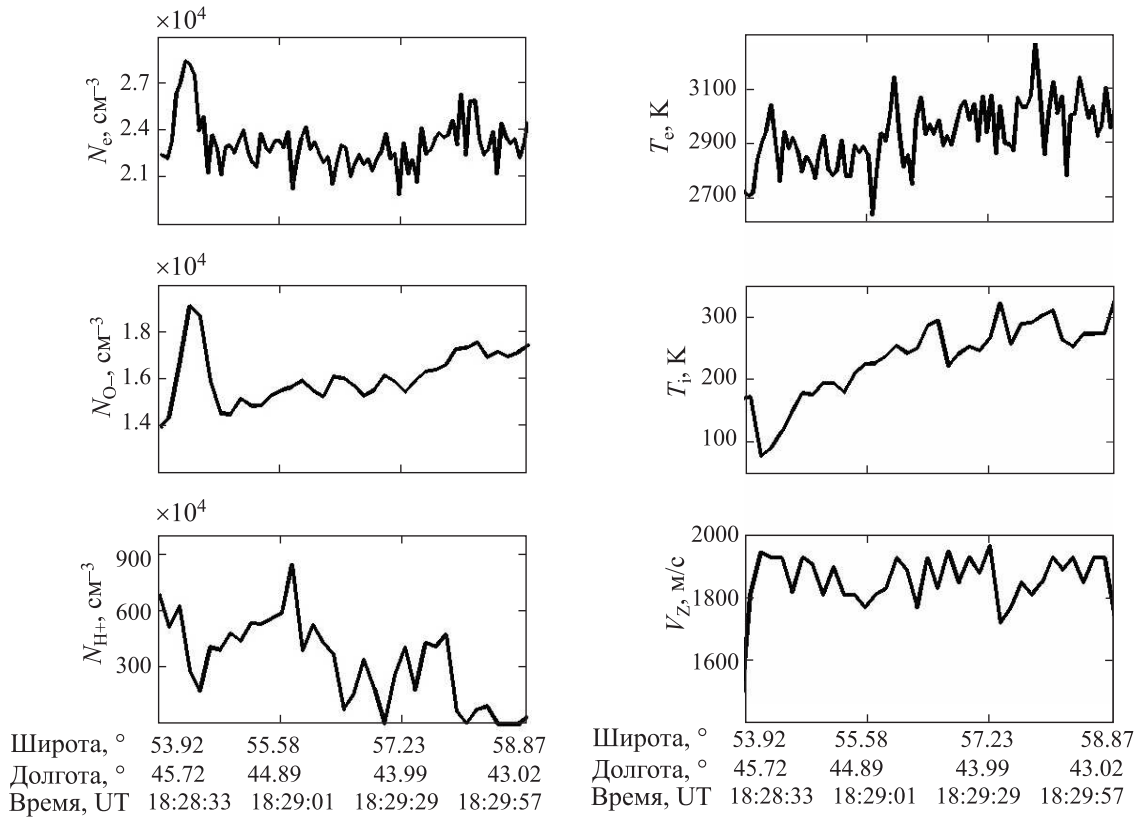


Рис. 1. В левом столбце показано изменение концентрации электронов N_e (вверху), ионов кислорода N_{O^+} (средняя панель) и водорода N_{H^+} (нижняя панель). В правом столбце сверху вниз приведены измерения температуры электронов T_e , температуры ионов T_i и компоненты скорости ионов V_z , направленной в противоположном к вектору скорости ИСЗ направлении. 1 мая 2006 г.

ного датчика IAP для N_{O^+}). Дакт обнаруживается с 18:28:40 до 18:28:49 UT с максимумом приращения плотности в нем в 18:28:44 UT. Это дает оценку размера дакта вдоль орбиты ИСЗ (приблизительно в широтном направлении) как ~ 70 км. Согласно результатам измерений, полученных с помощью анализатора плазмы и ленгмюровского зонда, в этом сеансе в дакте наблюдается уменьшение плотности наиболее легких ионов водорода N_{H^+} почти в 3 раза (см. нижнюю панель в левом столбце), уменьшение плотности ионов гелия более чем в 30 раз (здесь не показано), увеличение температуры электронов на $\sim 7\%$ (см. верхнюю панель в правом столбце) и уменьшение температуры ионов на $\sim 10\%$ (см. среднюю панель в правом столбце). Не было отмечено каких-либо вариаций вектора скорости ионов (см. нижнюю панель в правом столбце). Амплитуда вариаций магнитного поля в этом сеансе (как и во многих других) не превышала 1 рТ (т.е. была фактически на уровне их обнаружения). Также внутри дакта не наблюдались сколько-нибудь сильные вариации плотности и температуры плазмы с масштабами в несколько десятков километров поперек линий геомагнитного поля и каких-либо изменений в потоке энергичных электронов с $\varepsilon \geq 70$ кэВ.

На рис. 2 приведена спектрограмма вариаций горизонтальной компоненты вектора электрического

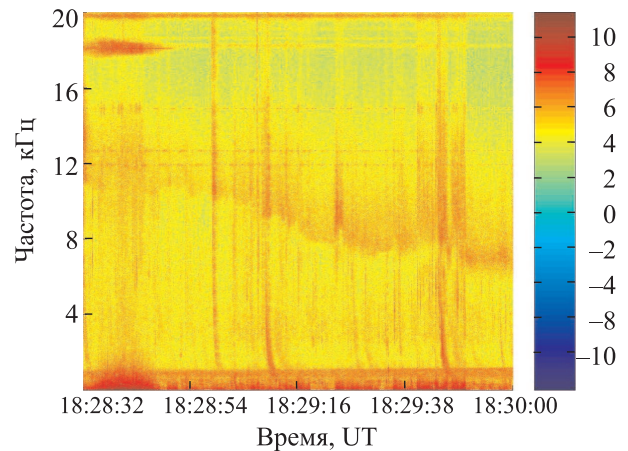


Рис. 2. Спектрограмма вариаций горизонтальной компоненты электрического поля в диапазоне 15 Гц — 20 кГц. 1 мая 2006 г.

поля, перпендикулярной направлению скорости ИСЗ, в диапазоне 15 Гц — 20 кГц. Отметим, что данная компонента вектора напряженности электрического поля менее всего подвержена различного рода неконтролируемым эффектам, связанным с движением спутника в плазме. Хорошо видно, что в дакте имеет место: 1) сильное увеличение флуктуаций электрического поля в диапазоне частот до ~ 2 кГц; 2) увеличение интенсивности шумов в диапазоне частот 6–16 кГц, что приводит к размытию границы нижнегибридных шумов; 3) уширение

спектра СДВ-сигналов, особенно сильно на частоте 18.1 кГц (до ± 500 Гц) и слабее на частотах 19.8 и 14.8 кГц (ниже мы подробно остановимся на анализе этого блока данных).

Сигнал на боковой частоте 2366 кГц в этом сеансе не регистрировался. Следовательно, отсутствовало просачивание мощности волны накачки во внешнюю ионосферу. Это связано с большой разницей между ее частотой и критической частотой f_{0F2} (подробнее см. разд. 4.4).

12 мая 2008 г.

В этом сеансе мощная радиоволна излучалась с 18:05 до 18:20 UT на частоте $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц ($f_{0F2} \approx 5.0$ МГц) с $P_{\text{эф}} = 80$ МВт с наклоном

диаграммы направленности 12° на юг; высота ее отражения была ~ 220 км. Следовательно, модификация ионосферы осуществлялась в условиях, когда частота волны накачки была на 0.7 МГц ниже f_{0F2} . Измерения выполнялись в очень спокойных геомагнитных условиях: $\Sigma K_p = 6^-$. Минимальное расстояние между орбитой ИСЗ и центром возмущенной магнитной силовой трубки составляло 21 км для $T^* = 18:16:28$ UT. Отметим, что во время проведения измерений в этом сеансе регистрировался полупрозрачный спорадический слой E_s с критической частотой до 4.7 МГц.

На рис. 3, а в левом столбце на панелях сверху вниз показаны изменение концентрации электронов N_e , ионов кислорода N_{O+} и водорода N_{H+} (см. также

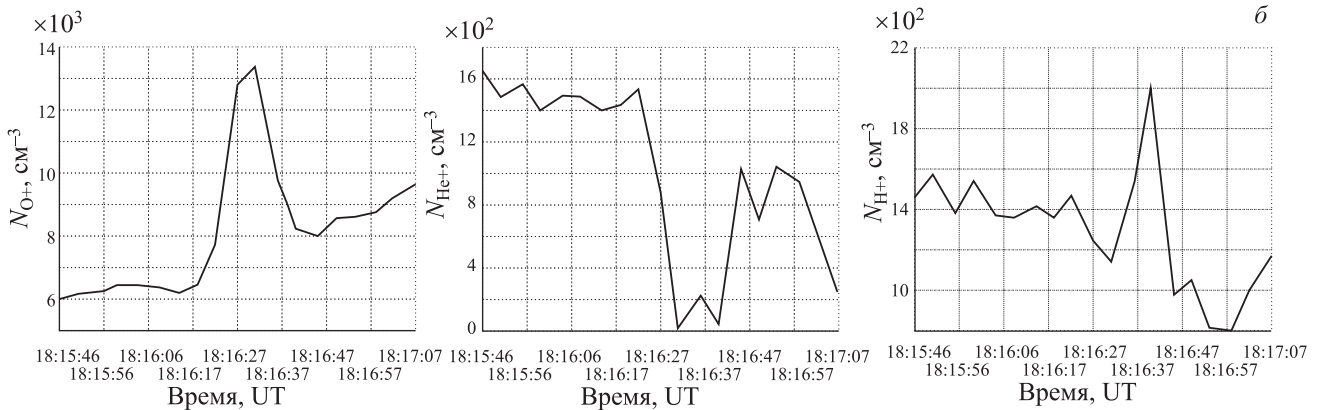
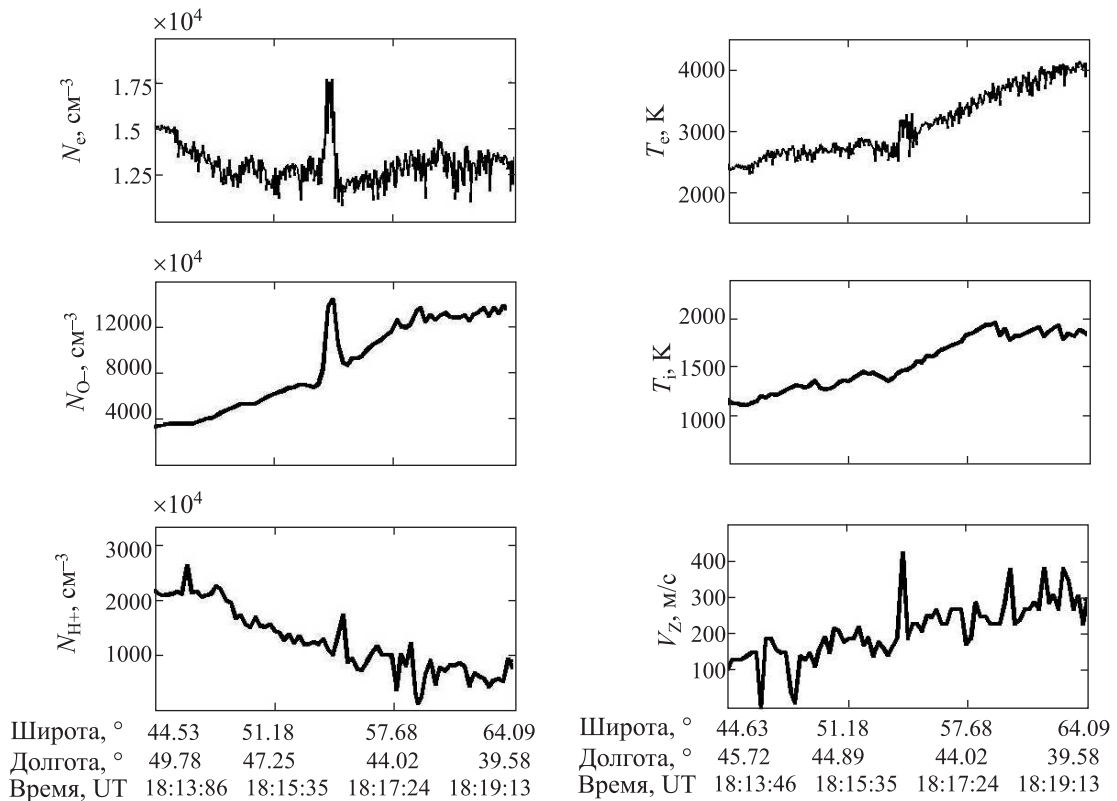


Рис. 3. а — В левом столбце показано изменение концентрации электронов N_e , ионов кислорода N_{O+} и водорода N_{H+} ; в правом столбце сверху вниз приведены измерения температуры электронов T_e , температуры ионов T_i и компоненты скорости V_z . 12 мая 2008 г.; б — Изменение концентрации ионов кислорода $NO+$, ионов гелия NHe^+ и водорода NH^+ . 12 мая 2008 г.

рис. 3, б); в правом столбце сверху вниз приведены измерения температуры электронов T_e , температуры ионов T_i и компоненты скорости V_z . По результатам измерений концентрации N_e и N_{O^+} видно формирование дакта с увеличенной плотностью плазмы на 37% по данным измерений N_e и на $\sim 75\%$ по данным измерений N_{O^+} . Дакт регистрировался с 18:16:21 до 18:16:36 УТ, что дает оценку его размера вдоль орбиты ИСЗ как ~ 110 км. Из полученных данных следует (см. рис. 3, б), что вместе с увеличением концентрации ионов O^+ наблюдается уменьшение концентрации ионов He^+ в 10 раз, причем ее минимум наблюдается несколько позднее максимума концентрации O^+ . Сложнее выглядит поведение концентрации ионов водорода H^+ : во время максимума для O^+ регистрируется небольшой минимум для H^+ , который сменяется максимумом сразу за северным краем дакта, что указывает на сильные вариации концентрации ионов H^+ внутри возмущенной трубки в поперечном к ней направлении. В этом сеансе в дакте наблюдается увеличение температуры электронов на 15% и уменьшение температуры ионов на 9%. Также внутри дакта обнаруживаются сильные вариации плотности и температуры электронов плазмы с масштабами ~ 20 км поперек линий геомагнитного поля. Ниже в разделе 4.2 мы вернемся к анализу тонкой структуры дактов. Согласно [26], при пересечении спутником дакта регистрировался вынос плазмы вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля со скоростью ~ 50 м/с при резком изменении поперечных (по отношению к геомагнитному полю) компонент скорости, как это видно на нижней панели в правом столбце рис. 2, где наблюдается резкое увеличение скорости V_z .

На рис. 4 приведены спектрограммы вариаций горизонтальной компоненты электрического поля в диапазоне частот 15 Гц — 20 кГц (верхняя панель) и магнитного поля в диапазоне до 1 кГц (средняя панель), зависимость от времени количества регистрируемых энергичных электронов с $\epsilon \approx 100$ кэВ (нижняя панель, время пересечения дакта отмечено затемненной полосой). Хорошо видно, что в дакте имеет место: 1) увеличение флуктуаций электрического поля в диапазоне частот до ≥ 20 кГц с особенно сильным их усилением в диапазоне до 400 Гц; 2) увеличение интенсивности флуктуаций напряженности магнитного поля в диапазоне частот до 150 Гц; 3) уширение спектра СДВ-станции на частоте 19.8 кГц; 4) возрастание в 2 раза по сравнению с уже увеличенным фоновым уровнем интенсивности потока энергичных электронов с $\epsilon \approx 70$ кэВ — 2.5 МэВ. Аналогичный эффект выпадения наблюдался также и 28 мая 2008 г. Генерация в дакте интенсивных электромагнитных излучений на таких низких частотах, а также увеличение в нем потока выпадающих из радиационных поясов энергичных электронов дало основание авторам [26] прийти к заключению об управляемом

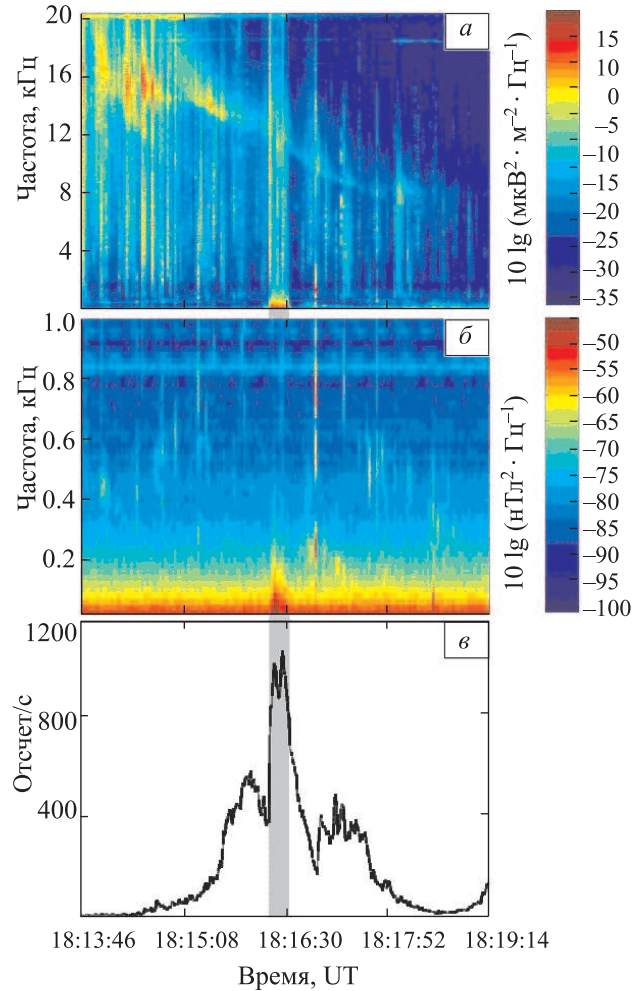


Рис. 4. Спектрограммы вариаций горизонтальной компоненты электрического поля в диапазоне частот 15 Гц — 20 кГц (верхняя панель) и магнитного поля в диапазоне до 1 кГц (средняя панель), зависимость от времени количества регистрируемых энергичных электронов с $\epsilon \approx 100$ кэВ (нижняя панель, время пересечения дакта здесь отмечено затемненной полосой). 12 мая 2008 г.

возбуждению в этом сеансе магнитосферного мазера путем формирования мощным радиоизлучением наземного передатчика искусственного волноводного канала (дакта плотности плазмы). Здесь остается открытым вопрос: является ли увеличенный уровень потока энергичных электронов с 18:15 до 18:18 УТ результатом работы станда СУРА, который требует своего отдельного рассмотрения. Очевидно, что возможность контролируемого возбуждения магнитосферного мазера при модификации ионосферы мощным КВ-радиоизлучением открывает перспективы локального активного воздействия на ионосферно-магнитосферные связи.

Следует отметить, что 12 мая 2008 г. был зарегистрирован повышенный уровень полного электронного содержания (ПЭС) в земной ионосфере, характеризуемый индексом планетарного ионосферного шторма, который во время измерений был выше критического и составлял $W_p = 5.4$ [38]. В качестве одной из причин подобного явления рассматривается

наличие усиленного потока плазмы в F_2 -область из плазмосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля. Поэтому хотя уровень геомагнитной активности в этот день и в предыдущие три дня был низким, состояние естественной ионосферы нельзя считать невозмущенным. По-видимому, магнитосфера и ионосфера были «подготовлены» к выпадению энергичных частиц и внешнее воздействие (модификация ионосферы мощными радиоволнами и образование дакта плотности плазмы) могло стимулировать этот процесс.

Высыпание энергичных электронов с $\varepsilon \approx 40$ кэВ, плотность потока которых увеличивалась на порядок во время модификации ионосферы, было зарегистрировано в экспериментах на нагревном стенде НААРП (Аляска, США) как над самим стендом, так и в магнитосопряженной к нему ионосфере, причем с увеличением геомагнитной активности поток выпадающих электронов увеличивался [39].

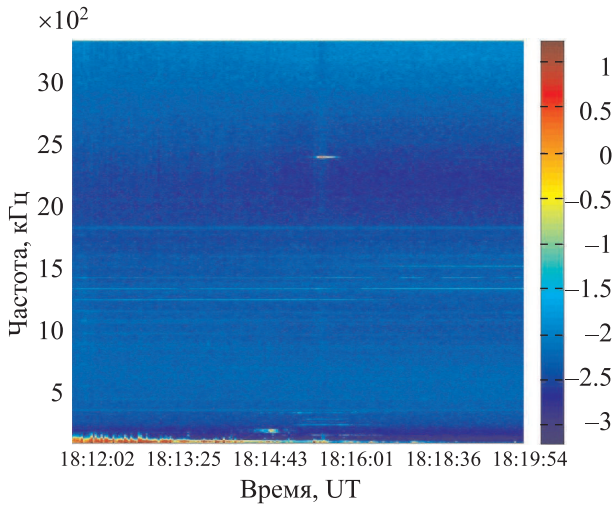


Рис. 5. Спектрограмма вариаций горизонтальной компоненты электрического поля для диапазона 10 кГц — 3.175 МГц. 12 мая 2008 г.

На рис. 5 представлена спектрограмма вариаций горизонтальной компоненты электрического поля для диапазона 10 кГц — 3.175 МГц. На ней хорошо видно появление сигнала волны накачки на боковой частоте $f_{бок} = 2366$ кГц на интервале времени $T = 18 : 15 : 59 - 18:16:42$ UT с максимальной интенсивностью в $T_{max} = 18:16:17$ UT. Эти данные демонстрируют, что при определенных условиях мощная радиоволна может проникать во внешнюю ионосферу, даже когда ее частота ниже критической частоты f_{0F2} невозмущенного F_2 -слоя. В разд. 4.4 мы подробнее остановимся на результатах подобного рода измерений.

18 апреля 2010 г.

В этом сеансе мощная радиоволна излучалась с 17:25 до 17:55 UT на частоте $f_{ВН} = 4300$ кГц ($f_{0F2} \approx 4.7$ МГц) с $P_{эф} = 40$ МВт с наклоном диаграммы направленности 12° на юг; высота ее отражения была ~ 260 км. Следовательно, модифи-

кация ионосферы осуществлялась в условиях, когда частота волны накачки была на 0.4 МГц ниже f_{0F2} . Измерения выполнялись в очень спокойных геомагнитных условиях: $\Sigma K_p = 5^-$. Минимальное расстояние между орбитой ИСЗ и центром возмущенной магнитной силовой трубки составляло 25 км для $T^* = 17:54:03$ UT.

На рис. 6 в левом столбце на панелях сверху вниз показано изменение концентрации электронов N_e , ионов кислорода N_{O+} и водорода N_{H+} ; в правом столбце сверху вниз приведены измерения температуры электронов T_e , температуры ионов T_i и компоненты скорости V_z . Из измерений концентрации N_i и N_{O+} видно формирование дакта с увеличенной плотностью плазмы на $\sim 20\%$ по результатам измерений N_e и на $\sim 40\%$ по результатам измерений N_{O+} с максимумом плотности в 17:54:01 UT. Размер дакта вдоль орбиты ИСЗ составляет ~ 130 км. Отметим, что повышение концентрации N_{O+} в этом сеансе сопровождается уменьшением более чем в 2 раза концентрации наиболее легких ионов H^+ (см. нижнюю панель в правом столбце) и приблизительно в 2 раза ионов He^+ . Помимо первого максимума, с 17:54:09 до 17:54:08 UT в этом сеансе регистрировался повторный более слабый максимум с $\delta N_{O+} \approx +14\%$ в 17:54:15 UT (или на ~ 85 км к северу от центра возмущенной магнитной силовой трубки). Между этими двумя максимумами находится область с минимумом плотности плазмы в $T_{min} = 17:54:09$ UT. Кроме того, синхронно с первым максимумом в N_{O+} регистрируется увеличение величины T_i на $\sim 10\%$. В этом сеансе также наблюдалось появление вариаций угла компоненты вектора скорости ионов в поперечном к $V_{ИСЗ}$ направлении с 17:53:49 UT до 17:54:23 UT (здесь не показано), т.е. на расстоянии ~ 240 км вдоль орбиты ИСЗ, что приблизительно в 3 раза превышает размеры основного дакта, а в 17:54:06 UT, возможно, имело место вызванное нагревом резкое кратковременное увеличение скорости V_z , совпадающее по времени с повторным максимумом в N_{O+} . Более сложные вариации регистрировались для плотности и температуры электронов (для N_e и T_e). По данным ленгмюровского зонда в этом сеансе одновременно с ростом величины N_e на 20% наблюдалось увеличение T_e на $\sim 10\%$. Севернее центра основного дакта видны сильные вариации плотности электронов (от -25% до $+40\%$), и их температуры (от -15 до $+25\%$), которые по времени можно соотнести с повторными максимумами в N_{O+} .

На рис. 7 приведена спектрограмма вариаций горизонтальной компоненты электрического поля в диапазоне частот 15 Гц — 20 кГц. На интервале времени от 17:53:54 до 17:54:03 UT (т.е. на расстоянии ~ 70 км вдоль орбиты ИСЗ и несколько севернее основного дакта) имело место усиление шумов в диапазоне частот до 2–3 кГц. В этом сеансе также регистрировалось пульсирующее уширение

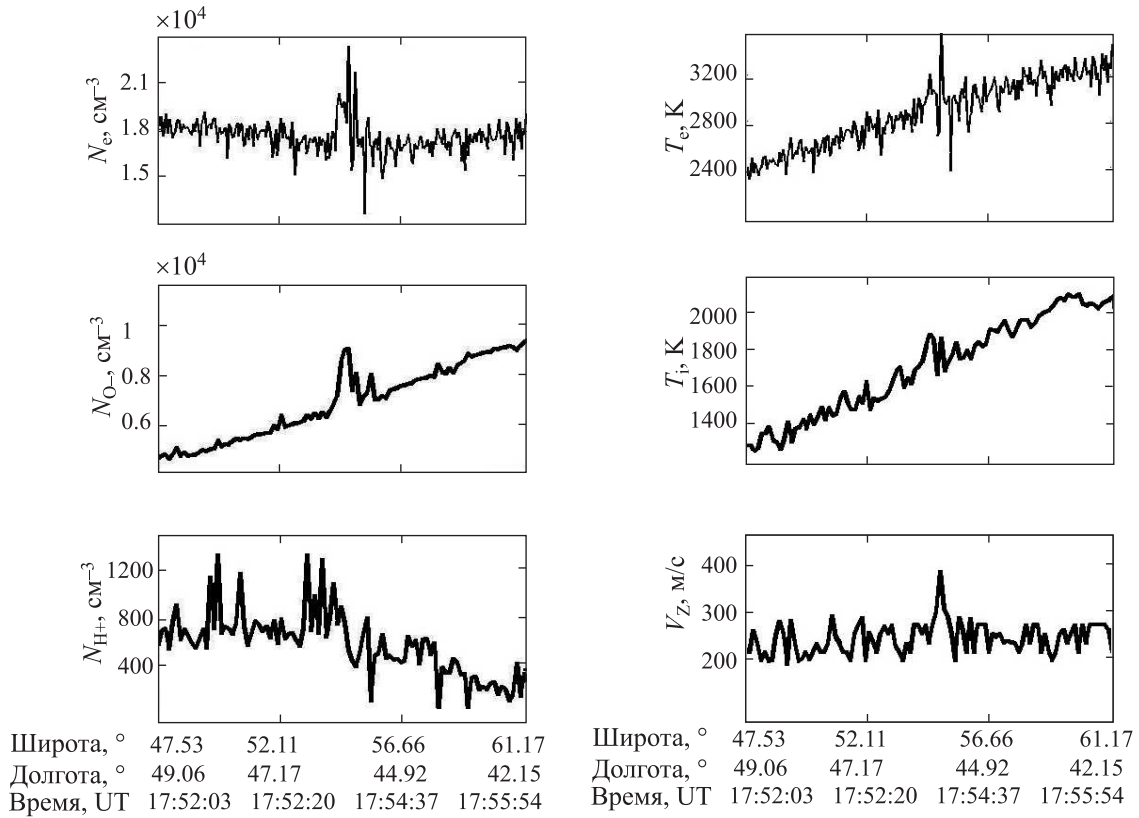


Рис. 6. В левом столбце показано изменение концентрации электронов N_e , ионов кислорода N_{O^+} и водорода N_{H^+} ; в правом столбце сверху вниз приведены измерения температуры электронов T_e , температуры ионов T_i и компоненты скорости V_z . 18 апреля 2010 г.

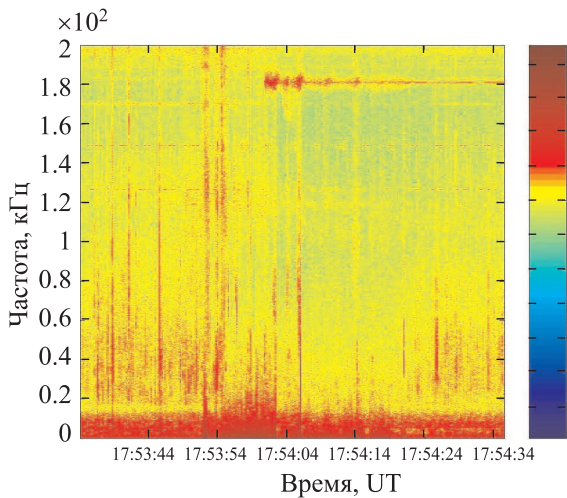


Рис. 7. Спектрограмма вариаций горизонтальной компоненты электрического поля в диапазоне 15 Гц — 20 кГц. 18 апреля 2010 г.

спектра сигнала СДВ-станции на частоте 18.1 кГц, которая, судя по рис. 7, включилась в 17:54:01 UT. Спектры показывают частотно-временную зависимость, выражаемую в их смещении со временем в сторону более высоких частот. В областях основного дакта и второго максимума плотности плазмы ($T_{\max} = 17:53:49$ и $17:53:55$ UT соответственно) сигнал СДВ-передатчика еще не регистрировался, но здесь наблюдались сильные локальные уширения спектра электрических полей ОНЧ-излучений

в диапазоне частот ≥ 20 кГц. Первое наиболее сильное уширение спектра и уширение спектра электрических полей ОНЧ-излучений, регистрируемое на интервале 17:54:01–17:54:03 UT, совпадает с положением третьего максимума в вариациях N_{O^+} ($T_{\max} = 17:54:04$ UT, см. рис. 6, средняя панель). К анализу этих данных мы еще вернемся в разд. 4.3.

Каких-либо заметных вариаций в магнитных полях в этом сеансе обнаружено не было.

На рис. 8 представлена спектрограмма вариаций горизонтальной компоненты электрического поля в диапазоне 10 кГц — 3.175 МГц. Сигнал волны накачки на боковой частоте 2366 кГц регистрировался в виде уединенного максимума с 17:53:40 до 17:54:13 UT; при этом центральное пятно наиболее интенсивного сигнала наблюдалось с 17:53:48 до 17:54:04 UT с максимумом его интенсивности в 17:53:56 UT. Результаты этих измерений ясно демонстрируют, что сигнал волны накачки на боковой частоте здесь обнаруживался на южном краю наиболее сильного дакта, заведомо вне области минимума плотности плазмы между двумя дактами.

Второй момент, на который следует обратить внимание, анализируя представленные на рис. 8 данные, это появление (усиление) принимаемых на фиксированных частотах сигналов в ДВ–СВ-диапазонах длин волн. Этот эффект здесь можно видеть на частотах ~ 80 , ~ 475 , ~ 530 , ~ 830 , ~ 1190 и ~ 2980 кГц, в других экспериментах он может

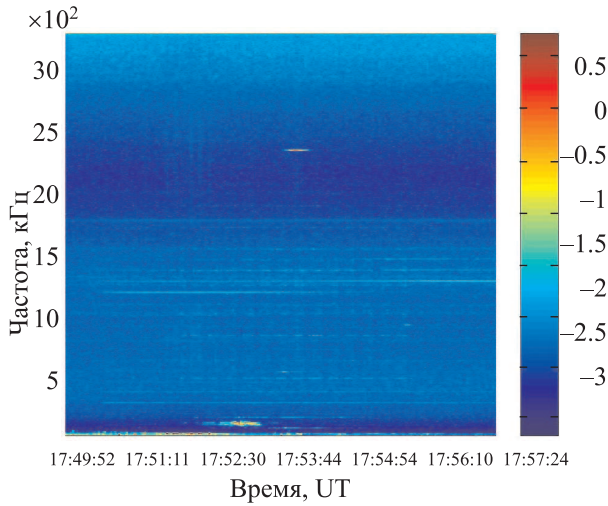


Рис. 8. Спектрограмма вариаций горизонтальной компоненты электрического поля для диапазона 10 кГц — 3.175 МГц, 18 апреля 2010 г.

обнаруживаться и на иных частотах. Область регистрации этих сигналов, как правило, занимает интервал времени от ± 1 мин до ± 4 мин относительно центра возмущенной магнитной силовой трубки, причем разные сигналы могут занимать несколько разные интервалы времени (см., например, рис. 5). Природа этого эффекта пока остается невыясненной. Если эти сигналы связаны с работой станда СУРА, то тогда следует признать, что модификация магнитосферы на пути распространения этих волн должна быть намного шире, чем размеры дакта. Последнее также может иметь отношение к наблюдаемому 12 мая 2008 г. широкому потоку энергичных электронов, намного превосходящему размер дакта (см. рис. 4, нижняя панель). О таких эффектах недавно сообщалось в [64].

3. Обсуждение результатов измерений

3.1. Свойства дактов плотности плазмы

Выполненные эксперименты позволяют сделать следующие выводы по характеристикам и условиям формирования дактов с повышенной плотностью плазмы:

- Повышение плотности плазмы в дактах в большинстве случаев составляет $\langle \delta N \rangle \approx 15\text{--}25\%$ по измерениям N_e и $20\text{--}40\%$ по измерениям N_{O^+} с максимальным значением N_{O^+} 75 и 80% в сеансах № 15 и 18. Размер дактов вдоль траектории ИСЗ (приблизительно поперек геомагнитного поля в широтном направлении) изменялся в пределах 60–130 км, имея средние значения $\langle L \rangle \approx 80\text{--}100$ км. Во всех случаях, когда имело место формирование дактов, на ионограммах вертикального зондирования наблюдалось развитие интенсивного F_{spread} , подавление O -моды и часто появление Z -моды, что свидетельствует о высокой эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой и генерации вблизи уровня ее отражения интенсивных искусственных ионосферных неоднородностей.

- Отличительной чертой регистрируемых дактов 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 ОНЧ передатчиков и уширение их частотного спектра до $\pm 200\text{--}500$ Гц. Имеются веские основания полагать, что подобного рода явления связаны с каналированием ОНЧ-сигнала в дакте плотности, образовавшемся при нагреве ионосферы мощной КВ-радиоволной. Ниже эти свойства дактов будут рассмотрены подробнее.

- Наиболее эффективно возбуждение дактов имело место, когда частота волны накачки была на 0.5–0.7 МГц ниже критической частоты f_{OF2} . При $f_{\text{ВН}}$ лишь немного меньше f_{OF2} , как показано в [27], наблюдается прохождение значительной доли ее энергии во внешнюю ионосферу, при этом условия формирования дактов ухудшаются. При $f_{OF2} - f_{\text{ВН}} > 1$ МГц эффективность возбуждения искусственной ионосферной турбулентности может уменьшаться как из-за уменьшения высоты отражения волны накачки, так и роста в области отражения градиента плотности плазмы.

- Формирование дактов наблюдалось, когда модификация ионосферы осуществлялась на частотах $f_{\text{ВН}} \leq 5$ МГц с достаточно высокой эффективной мощностью излучения волны накачки $P_{\text{eff}} \geq 40$ МВт. Высота отражения волны накачки при этом находилась в пределах 220–290 км.

- В целях усиления генерации искусственной ионосферной турбулентности за счет эффекта «магнитного зенита» в случае среднеширотного станда СУРА следует использовать пучок мощных радиоволн, наклоненный на угол $\sim 12^\circ$ на юг от вертикали (для $f_{\text{ВН}} \approx 5$ МГц), что обеспечивает более высокую эффективность взаимодействия мощной радиоволны O -поляризации с ионосферной плазмой.

- Есть тенденция увеличения прироста плотности в дакте по отношению к фоновой плотности с уменьшением концентрации плазмы. По-видимому, также следует считать, что условия возбуждения дактов ухудшаются при высоких ($f_{OF2} \geq 5.5\text{--}6$ МГц) критических частотах (при модификации плазмы высокой плотности). Заметим, что, согласно [40], при $f_{OF2} \geq 6$ МГц в среднеширотной ионосфере наблюдается резкое ослабление генерации естественного F_{spread} на ионограммах вертикального зондирования ионосферы (или генерации неоднородностей плотности плазмы километровых масштабов); также в возмущенной мощными радиоволнами ионосфере при $f_{OF2} \geq 6$ МГц регистрируется уменьшение интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы, уровень которой определяется эффективностью взаимодействия мощной радиоволны O -поляризации с ионосферной плазмой и интенсивностью мелкомас-

штабных искусственных ионосферных неоднородностей с $l_{\perp} \leq 50$ м [41].

- Установлено, что рост на 10–80% плотности ионной компоненты плазмы в дакте определяется ионами кислорода O^+ , преобладающими на высотах ~ 700 км. Ионы гелия He^+ показывают уменьшение плотности (до 30 раз), если концентрация плазмы была низкой ($(3.5-3.8) \cdot 10^4$ см $^{-3}$), увеличение плотности (до 9 раз), если концентрация была средней ($(4.6-5.2) \cdot 10^4$ см $^{-3}$), и их концентрация не изменяется, если плотность плазмы была высокой ($(5.5-6.1) \cdot 10^4$ см $^{-3}$). Наиболее легкие ионы водорода H^+ всегда показывают уменьшение плотности (до 7 раз). Таким образом, относительная величина уменьшения плотности ионов He^+ и H^+ много больше относительного увеличения плотности ионов O^+ , однако величина абсолютного уменьшения плотности ионов He^+ и H^+ в дакте всегда много меньше прироста плотности ионов O^+ .

- Поскольку средний поперечный размер дактов составляет 80–100 км, то их гарантированное обнаружение возможно только в том случае, если ИСЗ проходит на близком (≤ 40 км) расстоянии от центра возмущенной магнитной силовой трубки.

Невыполнение перечисленных выше условий для формирования дактов плотности плазмы объясняет отсутствие их регистрации практически во всех остальных проведенных нами сеансах модификации ионосферы по программе СУРА–DEMETER. Особо следует отметить сеанс № 9, в котором измерения проводились при расстоянии $D^* \sim 68$ км. Здесь дакт плотности из-за большого D^* не обнаруживался, но регистрировались вариации плазменных характеристик и электрических полей, которые, как будет показано ниже, могут выходить за область дакта. Следует, однако, подчеркнуть, что искусственные возмущения плазменных параметров и электрических полей никогда не обнаруживались, если расстояние D^* превышало 100 км.

Таким образом, основываясь на результатах всех проведенных на стенде СУРА измерений, можно заключить, что при выполнении перечисленных выше условий формирование дактов плотности плазмы при модификации F_2 -области ночной ионосферы мощными КВ-радиоволнами O -поляризации происходит с высокой вероятностью. Это позволяет использовать такие искусственные дакты в различных экспериментах по модификации состояния верхней ионосферы и магнитосферы Земли.

Сделаем замечание относительно сеанса № 26, в котором во время пролета ИСЗ над стендом СУРА регистрировался дакт плотности плазмы, хотя ко времени пролета ИСЗ критическая частота f_{0F2} уже упала до 3.7–3.9 МГц при $f_{ВН} = 4300$ кГц. Особенностью этого сеанса является то, что модификация ионосферы началась за 1.5 ч до пролета ИСЗ, когда еще выполнялось условие $f_{0F2} > f_{ВН}$, и продолжалась все время до окончания этого сеанса. Можно пред-

полагать, что поддержание уже созданного дакта какое-то время происходит и в условиях, когда частота волны накачки немного выше критической частоты f_{0F2} , особенно если частота верхнегибридного резонанса еще остается ниже f_{0F2} , как это неоднократно наблюдалось в нагревных экспериментах [42, 43]. Также не исключено, что здесь мог регистрироваться дакт уже на стадии своей релаксации после окончания эффективной модификации плазмы, которая может длиться десятки минут. Следует также принимать во внимание возможность поддержание плотности плазмы в F_2 -области ионосферы во время его модификации мощной радиоволной за счет эффекта дополнительной искусственной ионизации.

Отметим также сеанс № 28, в котором был зарегистрирован дакт с уменьшенной плотностью плазмы. Поскольку модификация ионосферы в этом случае осуществлялась в условиях $f_{ВН} > f_{0F2}$ и, кроме того, он регистрировался спустя 5–22 с после пролета ИСЗ мимо центра возмущенной магнитной силовой трубки, следует считать, что этот дакт имеет естественное происхождение.

Исходя из орбиты ИСЗ DEMETER, измерения с его помощью над стендом СУРА были возможны только в полуденные и поздние вечерние (ночные) часы. Это недостаток был частично компенсирован измерениями, выполненными с помощью бортовой аппаратуры американских спутников серии DMSP, которые пролетали над стендом СУРА в 5–6 UT утром и в 13–14 UT в ранние вечерние часы. Их результаты представлены в [23, 24, 37], на основании которых можно сделать заключение, что формирование дактов с повышенной плотностью плазмы наблюдалось и в этих условиях, однако величина увеличения плотности плазмы в них не превышала нескольких процентов в утренние часы и была не выше 1% в вечернее время. Заметим, что во время этих измерений в вечерние часы критические частоты были достаточно высоки (≥ 6 МГц) [37], что, как отмечалось выше, могло повлиять на интенсивность формирующихся дактов.

Формирование дактов с увеличенной плотностью плазмы наблюдалось и в экспериментах, выполняемых на стенде HAARP [44–46], в которых были получены аналогичные нашим величины увеличения плотности плазмы и показано, что формирование дактов — обычно наблюдаемое явление, что наиболее интенсивные дакты с δN_e до 40% формируются в условиях ночной ионосферы, когда мощная радиоволна излучается в магнитный зенит, в то время как в дневных условиях приращение плотности в плазме в дакте не превышает 10%, что в структуре дактов обнаруживаются неоднородности плотности плазмы с размерами поперек геомагнитного поля до 10–20 км. Кроме того, было также установлено, что из области генерации интенсивной искусственной ионосферной турбулентности вблизи высоты отражения волны накачки наблюдается вынос ионов наверх

вдоль силовых линий геомагнитного поля во внешнюю ионосферу, что, согласно принятым моделям (см. ниже), и определяет формирование дактов.

3.2. Тонкая структура дактов плотности плазмы. Вариации температуры электронов и ионов в дакте

Еще в первых ионосферных экспериментах по исследованию структуры возмущений плотности плазмы на высотах внешней ионосферы с помощью ИСЗ DEMETER было показано, что дакты включают в себя неоднородности плотности плазмы с размерами поперек геомагнитного поля ~ 30 км [22].

На рис. 9 представлены с достаточно высоким временным разрешением результаты измерений плотности электронов N_e и их температуры T_e в выполненном 12 мая 2008 г. эксперименте, условия проведения и результаты которого рассматривались выше. Измерения N_e и T_e выполнялись каждую секунду с помощью ленгмюровского зонда. На интервале времени $T = 18:16:21 - 18:16:36$ UT регистрировалось увеличение в среднем плотности электронов (формирование дакта плотности плазмы) приблизительно на 37% и сильные вариации ее значений с периодом $T \approx 2.5$ с или с пространственным масштабом ~ 19 км вдоль орбиты ИСЗ приблизительно в широтном направлении. В этом сеансе наблюдался также рост средней температуры T_e приблизительно на 15% и сильные вариации ее уровня. Обращает на себя внимание высокая степень корреляции вариаций N_e и T_e : видно, что положения их максимумов и минимумов практически полностью совпадают.

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 ($L \approx 15-23$ км) регистрировались только в области плазменного дакта, они в большинстве случаев хорошо повторяют друг друга даже в деталях, однако величина относительных вариаций температуры T_e плазмы всегда меньше

относительной величины вариаций ее плотности. На основании полученных результатов можно полагать, что формируемый во внешней ионосфере плазменный дакт, может содержать внутри себя до 10–15 неоднородностей плотности плазмы с размерами поперек геомагнитного поля ~ 20 км. Согласно результатам численного и лабораторного моделирования распространения волн свистового диапазона в плазме с мелкокомасштабными (по сравнению с длиной волны) неоднородностями [47], такие неоднородности могут обеспечивать режим волноводного распространения низкочастотных волн, возбуждаемых наземными передатчиками, и способствовать эффективному выводу низкочастотной мощности из волновода «Земля-ионосфера» в магнитосферу.

Выполненные эксперименты показали, что в дактах, как правило, регистрировалось увеличение температуры T_e (от 6 до 23%). Более сложным было поведение температуры ионов. Здесь в 5 случаях из 10 наблюдалось уменьшение температуры T_i (до 10%), в двух она оставалась без изменения, а в трех возрастала (до 16%). При этом увеличение температуры T_i наблюдалось, когда ВН отражалась на больших высотах $h \geq 250$ км, при $h \approx 240$ км наблюдалось небольшое уменьшение величины T_i (на 3–5%), при еще более низких высотах отражения мощной радиоволны $h \approx 220-230$ км величина уменьшения T_i возрастала, достигая 10%. В чем причина такой зависимости T_i от высоты отражения волны накачки, остается пока неясным.

3.3. Структура электрических полей НЧ- и ОНЧ-диапазонов в дакте

При рассмотрении полученных с помощью бортовой аппаратуры ИСЗ DEMETER экспериментальных данных было продемонстрировано, что при модификации F_2 -области ионосферы мощными радиоволнами O -поляризации во внешней ионосфере регистрируется появление электромагнитных полей в диапазоне частот до 20 кГц и более. Ниже, следуя [25], мы на примере измерений 1 мая 2006 г.

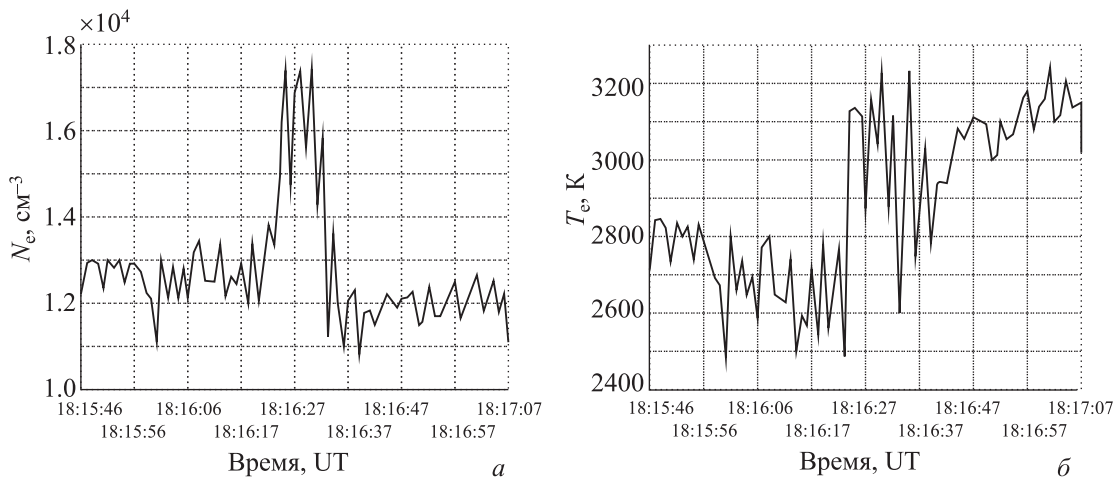


Рис. 9. Изменение плотности электронов N_e и их температуры T_e в дакте плотности плазмы. 12 мая 2008 г.

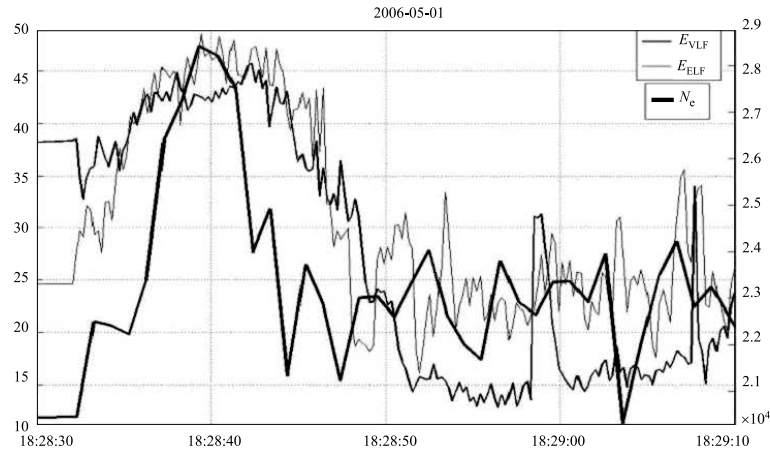


Рис. 10. Зависимость от времени электронной концентрации N_e (жирная линия) и интенсивности электрических полей в диапазоне до 1 кГц (тонкая линия) и интенсивности электрических полей в диапазоне до 17.1–19.1 кГц, включающем СДВ-сигнал на частоте 18.1 кГц (нормальная линия). 1 мая 2006 г.

подробно рассмотрим результаты исследований их характеристик.

Представленные на рис. 2 результаты измерений показывают, что имеет место схожий характер поведения во времени интенсивности сигнала СДВ-станции на частоте 18.1 кГц и интенсивности квазистатического электрического поля в диапазоне частот до ~ 1 кГц. На рис. 10 приведены зависимости от времени (и, следовательно, расстояния ИСЗ до центра возмущенной магнитной силовой трубки) электронной концентрации N_e , интенсивности электрических полей в диапазоне до 1 кГц (в КНЧ-диапазоне) и интенсивности электрических полей в диапазоне до 17.1–19.1 кГц (в ОНЧ-диапазоне), включающем СДВ-сигнал на частоте 18.1 кГц. Хорошо видно, что пространственная структура изменения спектра электрического поля СДВ-сигнала полностью повторяет структуру спектра вариаций электрического поля в диапазоне частот до 1 кГц, показывая увеличение амплитуды полей на ~ 30 и ~ 25 дБ соответственно. Размер области вдоль орбиты ИСЗ, где регистрировались эти поля, составляет ~ 200 км, что значительно шире размера области с повышенной электронной концентрацией (~ 70 км). Отметим также некоторую асимметрию положения области с повышенным уровнем электрических полей относительно оси дакта.

Особый интерес представляют характеристики СДВ-сигнала на частоте 18.1 кГц. Видно, что вблизи возмущенной магнитной силовой трубки, кроме его интенсивности, сильно возрастает и ширина спектра принимаемого излучения, которая в своем максимуме достигает величины ± 500 Гц, соответствующая ширине спектра регистрируемого КНЧ-сигнала.

На рис. 11 приведена последовательность сглаженных спектров интенсивности электрического и магнитного полей сигнала СДВ-диапазона в интервале частот 17.5–18.7 кГц для последовательных моментов времени и расстояний до центра возмущенной магнитной силовой трубки. На рисунке

спектральная плотность интенсивности электрического поля показана тонкой линией (левая шкала интенсивности, в дБ к 1 мкВ/м), спектральная плотность магнитного поля показана жирной линией (правая шкала интенсивности, в дБ к 1 нТл). Исходные спектры строились по массивам данных продолжительностью ~ 0.2 с (спектральное разрешение 5 Гц), затем проводилось усреднение спектров по 10 последовательным реализациям. На рисунке приведена последовательность усредненных спектрограмм с шагом 2с. Видно, что спектры электрического ОНЧ-поля вблизи области нагрева на положительных и отрицательных расстройках (от центральной частоты) подобны и состоят из двух компонент: квазимонохроматической линии на частоте работы СДВ-передатчика (на частоте 18.1 кГц) и широкополосной компоненты (шумового континуума) с максимумом на той же частоте. Уровень электрического поля СДВ-передатчика уменьшается не менее чем на 50 дБ: от уровня +30 дБ для 18:28:44 UT до уровня не более –20 дБ для 18:28:54 UT (на расстоянии $D \geq 100$ км от центра возмущенной трубки). Спектр шумовой компоненты электрического поля на расстояниях до $D \approx 80$ –90 км имеет выраженную уплощенную вершину, что существенно расширяет полосу сигнала. Из рисунка также видно, что спектр вариаций магнитного поля значительно уже спектра вариаций электрического поля. Положения максимума спектра магнитного поля соответствует положению квазимонохроматической линии в спектре электрического поля.

В [25] на основе имеющей место высокой пространственной корреляции области повышенной интенсивности ОНЧ-поля с областью повышенной интенсивности квазистатического электрического КНЧ-поля делается вывод, что это, скорее всего, связано с присутствием мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации плазмы, которые, исходя из ширины спектра сигнала СДВ-станции $\Delta\omega \approx (k_{\text{неодн}} \cdot V_{\text{ИСЗ}})$ при скорости ИСЗ

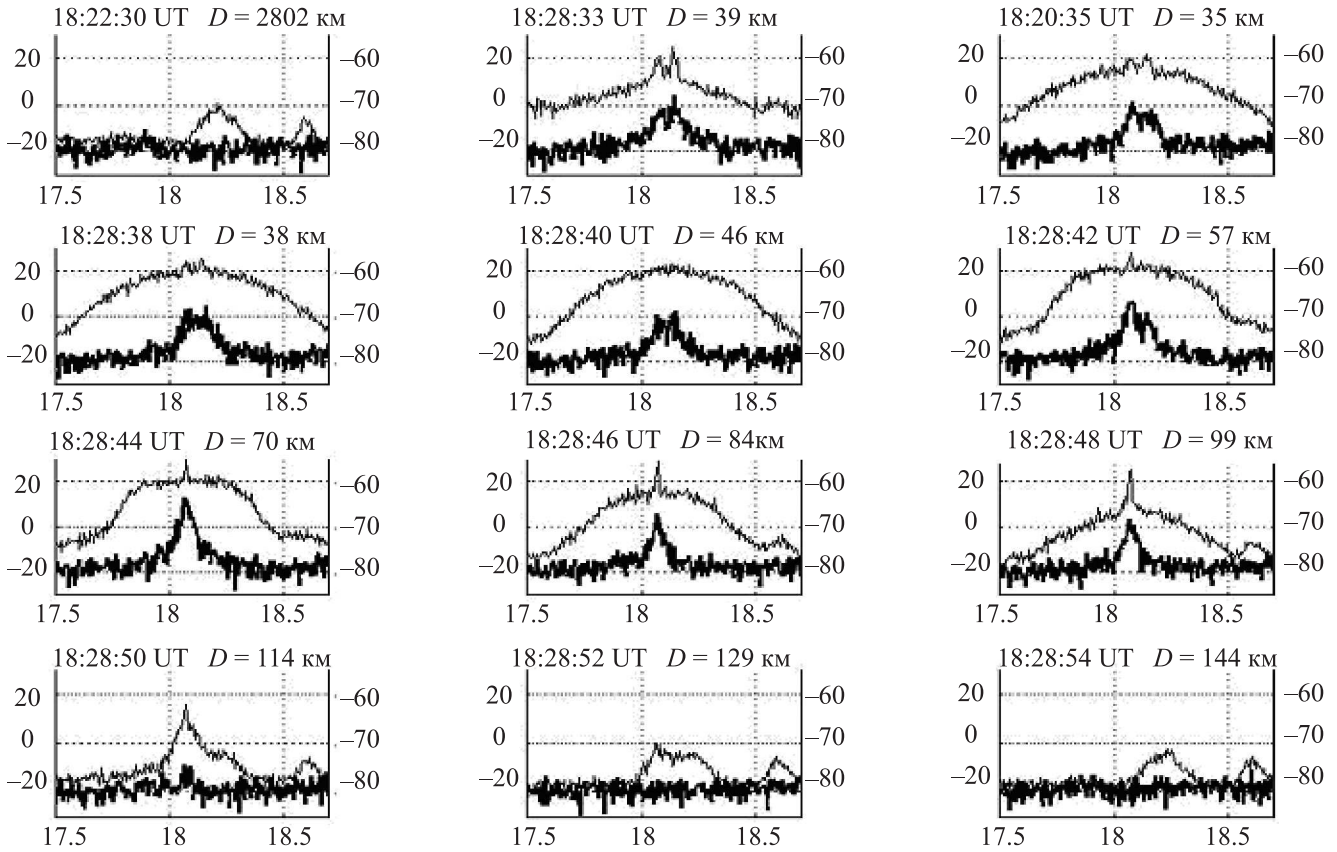


Рис. 11. Последовательность smoothed спектров интенсивности для электрического (нормальная линия) и магнитного (жирная линия) полей сигнала СДВ-диапазона в интервале частот 17.5–18.7 кГц для последовательных моментов времени и расстояний D до центра возмущенной магнитной силовой трубки. 1 мая 2006 г.

~ 7.6 км/с, имеют размеры $l_{\perp} \approx 10-10^3$ м. Эти неоднородности, а не дакт, существенным образом влияют на захват ОНЧ-волн и их распространение в ионосферно-магнитосферной плазме. Как отмечалось выше, к аналогичному выводу влияния таких неоднородностей на распространение радиоволн свистового диапазона пришли на основе лабораторного и численного моделирования авторы работы [47].

Уширение спектра СДВ-передатчиков до ~ 1 кГц с одновременным появлением электростатических КНЧ-шумов давно наблюдается в естественных условиях в авроральных широтах, где имеет место повышенный уровень ионосферной турбулентности. Анализ этого эффекта приведен в [48–50], где показано, что уширение спектра ОНЧ-сигналов и резкое возрастание электрического поля в ОНЧ-волне может быть объяснено трансформацией исходной свистовой волны в низкочастотные плазменные волны на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях (с $l_{\perp} \leq 1-2$ км), которые появляются в ионосфере за счет развития различного типа неустойчивостей. Здесь имеет место уменьшение мощности сигнала на его центральной частоте, при этом мощность сигнала в полосе боковых частот может в 10–100 раз превысить уровень ослабленной мощности монохроматического сигнала передатчика. Видно, что своим параметрам эффекты, связанные с уширением спектра сигналов СДВ-передатчиков в естествен-

ной и модифицированной мощной КВ-радиоволной ионосфере хорошо совпадают. Это может служить дополнительным подтверждением наличия в возмущенной магнитной силовой трубке на высотах внешней ионосферы неоднородностей с $l_{\perp} \leq 10^3$ м.

Отметим, что с помощью аппаратуры ИСЗ DEMETER сигналы в КНЧ/ОНЧ-диапазонах были зарегистрированы при работе стенда HAARP (США) [51]. В ночных условиях на высотах внешней ионосферы регистрировалось возбуждение сильных возмущений температуры и плотности плазмы в поле мощной ОНЧ-волны, излучаемой расположенным в Австралии навигационным радиопередатчиком NWC. При этом наблюдаемое уширение спектра сигнала самой мощной волны авторами [52] также связывалось с возбуждением искусственных неоднородностей плотности плазмы внутри возмущенной магнитной силовой трубки.

На рис. 7 были приведены результаты выполненных 18.04.2010 измерений спектра сигнала СДВ-станции на частоте 18.1 кГц. Условия и некоторые результаты этого эксперимента рассматривались выше. Важно отметить, что как уширение спектра СДВ-сигнала, так и усиление интенсивности и уширение спектра КНЧ-шумов здесь носит пульсирующий характер, причем максимумы уширения совпадают с максимумами плотности плазмы. Последнее свидетельствует о том, что неоднородности

плотности плазмы с $l_{\perp} \leq 10^3$ м сосредоточены здесь в более крупномасштабных неоднородностях с повышенной плотностью плазмы.

Наконец, отмеченное при анализе полученных экспериментальных данных усиление широкополосных шумов в диапазоне частот 6–16 кГц (вблизи нижнегибридной частоты плазменных колебаний) по своим характеристикам соответствует результатам [17], где было показано, что их появление связано с рассеянием коротковолновых нижнегибридных плазменных колебаний, возбуждаемых при развитии тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости вблизи высоты отражения мощной радиоволны O -поляризации, на вытянутых вдоль геомагнитного поля мелкомасштабных неоднородностях плотности плазмы в поперечные волны свистящих атмосфериков, уходящих затем во внешнюю ионосферу.

3.4. Прохождение поля волны накачки во внешнюю ионосферу

Детальное изучение условий, когда энергия мощной радиоволны может просачиваться во внешнюю ионосферу при условии, что невозмущенный мощной радиоволной F_2 -слой ионосферы являлся непрозрачным, было выполнено в [27] на основе всех данных, полученных за время миссии ИСЗ DEMETER. При этом анализировались результаты экспериментов, когда: 1) частота волны накачки была выше критической частоты F_2 -слоя ионосферы (нагрев «на просвет»), 2) $f_{ВН}$ была лишь немного ниже f_{0F2} и 3) $f_{ВН}$ была значительно ниже ее. Для 12 мая 2008 г. и 18 апреля 2010 г. результаты регистрации сигнала волны накачки на боковой частоте относительно частоты его оцифровки прибором ICE были продемонстрированы на рис. 5 и 8 соответственно. Для сеанса 1 мая 2006 г., когда частота волны накачки была на 1.4 МГц ниже критической частоты f_{0F2} , сигнал на боковой частоте не регистрировался.

Анализ полученных экспериментальных данных, следуя [27], показал, что:

1) регистрация электрического поля волны накачки на высотах внешней ионосферы была возможна не только когда $f_{ВН} > f_{0F2}$, но и когда частота мощной радиоволны O -поляризации была меньше критической частоты f_{0F2} до начала модификации ионосферы, но не больше чем на 0.5–0.7 МГц;

2) прошедшая в условиях $f_{ВН} < f_{0F2}$ мощная радиоволна имела высокую интенсивность, которая по своей величине была порядка интенсивности волн, зарегистрированных при излучении мощной радиоволны «на просвет»;

3) интенсивность сигнала волны накачки испытывала большие вариации для близких условий измерений;

4) имело место совпадение пятна с наибольшей интенсивностью сигнала с дактом повышенной плотности плазмы.

В [27] была предложена модель прохождения излучения на частоте волны накачки во внешнюю ионосферу при модификации ионосферы мощным КВ-радиоизлучением за счет совместного влияния уменьшения на 10–30% плотности плазмы вблизи высоты отражения мощной радиоволны (образование полости с дефицитом плотности плазмы или фокусирующей линзы) [10, 31] и генерации искусственных неоднородностей километровых масштабов с пониженной плотностью плазмы километровых масштабов. В рамках этой модели удастся объяснить все отмеченные выше основные свойства полученных экспериментальных данных. В первую очередь это касается частотного интервала регистрации сигнала во внешней ионосфере ($f_{0F2} - f_{ВН} \leq 0.5 - 0.7$ МГц), высокой интенсивности принимаемого бортовой аппаратурой ИСЗ излучения и его сильной изменчивости, а также причины, почему направление уходящего во внешнюю ионосферу излучения совпадает с направлением геомагнитного поля. Последнее связано с рефракционным доворотом пучка мощных радиоволн на фокусирующей линзе. Предложенный механизм объясняет и отсутствие прохождения сигнала ВН во внешнюю ионосферу в дневных условиях при $f_{ВН} < f_{0F2}$, поскольку формирование области с пониженной плотностью плазмы и развитие неоднородностей ее концентрации оказываются в значительной степени подавленными.

Существование эффекта ослабления генерации искусственной ионосферной турбулентности на высотах отражения волны накачки в условиях, когда частота мощной радиоволны до ее включения была лишь немного меньше частоты f_{0F2} , отмечалось:

1) в работе [23], где наблюдалось ухудшение образования дактов плотности плазмы;

2) в работе [53], где по измерениям ракурного рассеяния регистрировался срыв генерации искусственных мелкомасштабных неоднородностей в центре диаграммы направленности;

3) в работе [54], где область оптического свечения имела форму кольца с его исчезновением в центре диаграммы направленности.

Во всех случаях это связывалось с просачиванием мощной радиоволны через сильно турбулизованый F_2 -слой ионосферы.

Результаты наших измерений не соответствуют выводам работы [55], в которой обнаруженное усиление сигнала волны накачки на высотах орбиты ИСЗ связывается с фокусировкой пучка мощных радиоволн в дакте с пониженной плотностью плазмы. В нашем случае интенсивный сигнал волны накачки наблюдался внутри дакта с повышенной плотностью плазмы, в котором он, вообще говоря, должен был испытывать дефокусировку, и, наоборот, не обнаруживалось влияния фокусировки луча в структурах с пониженной плотностью плазмы между двумя ее локальными максимумами (см. результаты измере-

ний за 18.04.2010 и рис. 8). В [27] предполагается, что эффект дефокусировки мощной радиоволны в дакте с повышенной плотностью плазмы компенсируется за счет фокусировки пучка мощных радиоволн на полости с пониженной плотностью плазмы (на фокусирующей линзе), образующейся вблизи высоты отражения мощной радиоволны.

4. Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами моделирования тепловых возмущений околоземной плазмы

Географическое расположение нагревного стенда СУРА в средних широтах позволяет использовать широко применяемую в настоящее время численную двумерную модель низко- и среднеширотной ионосферы SAMI2 (Sami2 is Another Model of the Ionosphere) [56] для моделирования процессов плазменных возмущений, индуцируемых при нагреве ионосферной плазмы мощными радиоволнами. Модель SAMI2 описывает динамику плазмы и химические процессы для ионосферы, содержащей семь основных сортов ионов (H^+ , He^+ , N^+ , O^+ , N_2^+ , NO^+ и O_2^+), в интервале высот от 100 км до нескольких тысяч километров. Околоземная плазма описывается гидродинамическими уравнениями переноса ионов и электронов, дополненных условием квазинейтральности. Поведение нейтральной компоненты ионосферы задается с помощью эмпирических моделей NRLMSIS00 и HWM93. Для моделирования тепловых эффектов в уравнение теплопроводности для электронов в программном коде модели SAMI2 был введен дополнительный источник Q_{HF} , связанный с нагревом электронов полем плазменных волн, эффективно возбуждаемых мощной радиоволной вблизи уровня ее отражения от ионосферы [57, 58].

Следуя результатам численного моделирования [58], выполненного для сеанса измерений 1 мая 2006 г., можно сделать следующие выводы.

1. Индуцируемые возмущения плазмы локализованы в достаточно узкой силовой трубке геомагнитного поля с характерным поперечным масштабом ~ 100 км. При этом возмущения температуры и концентрации электронов захватывают практически всю толщу ионосферы и регистрируются как ниже области отражения ВН (до ~ 170 км), так и на высотах внешней ионосферы Земли.

2. Нагрев плазмы F_2 -слоя ионосферы мощными радиоволнами приводит к образованию полости с уменьшенной на 5–10% плотностью плазмы на высотах 200–400 км, что соответствует результатам измерений (см., например, [31]).

3. Дакт с увеличенной плотностью плазмы обнаруживается на высотах $h > 400$ км. Согласно сделанным расчетам, размер дакта составляет ~ 80 км (70 км — измеренное значение), увеличение плотности плазмы в дакте равно $\sim 25\%$ (21% по измерениям N_e) при увеличении температуры электронов на $\sim 6\%$ (7% — измеренное значение). Видно, что

имеет место полное соответствие результатов моделирования экспериментальным данным.

4. Результаты моделирования показывают, что возмущения концентрации электронов достигают высоты 660 км за время порядка 2.5 мин и наблюдаются в виде локализованного дакта с повышенной до 25% относительно фонового уровня концентрацией плазмы. Время полной релаксации возмущений к фоновому уровню после выключения нагрева составляет ~ 30 мин. Следует, однако, отметить, что уменьшение плотности плазмы в дакте происходит с более высоким темпом в первые 6 мин после окончания нагрева, чем на больших временах.

5. В области возмущенной магнитной силовой трубки регистрируется увеличение концентрации ионов O^+ , в то время как более легкие ионы H^+ показывают, наоборот, уменьшение своей концентрации. Данный результат подтверждается приведенными в работе экспериментальными данными. Такое разнонаправленное изменение O^+ и H^+ при модификации ионосферы связано с тем, что их высотные профили различны: максимум концентрации ионов O^+ находится на высотах ~ 300 км, и поэтому движение этих ионов вверх приводит к увеличению их концентрации на больших высотах; максимум концентрации более легких ионов H^+ находится на высотах ~ 800 км, и поэтому ниже 800 км их плотность из-за движения вверх должна уменьшаться. Отметим, что, согласно [57], аналогичный эффект имеет место и при воздействии на околоземную плазму излучением мощных связанных СДВ-радиопередатчиков.

6. Во время воздействия мощного КВ-радиоизлучения скорость ионов O^+ выше области отражения ВН направлена вверх (в южную полусферу для стенда СУРА) и составляет около 100–150 м/с. При выключении нагрева направление скорости ионов изменяет знак при сохранении приблизительно ее величины. Зависимость от времени скорости H^+ имеет аналогичный характер. Скорость выноса ионов при модификации ионосферы мощными КВ-радиоволнами много раз измерялась экспериментально (см., например, работы [46, 59–62]). Согласно результатам этих измерений величина скорости изменяется в пределах от 30 до 300 м/с, увеличиваясь с ростом высоты.

Таким образом, результаты выполненного в работе [58] моделирования хорошо соответствуют основным результатам представленных выше натурных экспериментов. Они также находятся в согласии с результатами аналогичного моделирования, выполненного в работе [46] для условий модификации ионосферы на стенде HAARP. Все это, с одной стороны, позволяет считать, что имеется достаточно полное представление о процессах, протекающих в модифицированной мощными радиоволнами ионосфере, а с другой, используя возможности численного моделирования, — достичь более глубокого

их понимания за счет получения необходимой дополнительной информации о плазменных процессах, протекающих в ВО ионосферы, которую не всегда удается получить экспериментально. В первую очередь это касается изучения динамических процессов при формировании дактов плотности плазмы.

Заключение

Выполненные в 2005–2010 гг. исследования по программе СУРА–ДЕМЕТЕР продемонстрировали, что при воздействии мощными радиоволнами O -поляризации на F_2 -область ионосферы на высотах внешней ионосферы (на высотах $h \geq 400$ км) формируются дакты с повышенной плотностью плазмы, возникают возмущения плотности и температуры плазмы, а также регистрируются КНЧ–ОНЧ излучения. При этом наиболее сильные возмущения и интенсивные электрические поля обнаруживаются внутри дактов, хотя более слабые возмущения и поля, а также вариации скорости ионов могут регистрироваться и за их пределами. Анализ полученных экспериментальных данных позволил изучить характеристики дактов плотности плазмы и определить условия их формирования. Было установлено, что при выполнении определенных условий формирование дактов при модификации ночной F_2 -области ионосферы мощными КВ-радиоволнами — достаточно обычное явление. Последнее подтверждается экспериментами, выполненными на стенде HAARP [46], а также результатами радиотомографических исследований [63].

Анализ экспериментальных данных, полученных при выполнении программы СУРА–ДЕМЕТЕР, показал, что в них не нашло подтверждения факта влияния работы СУРЫ на условия прохождения свистящих атмосфериков, как это было получено в [16]. По-видимому, в нашем случае формирование дактов не распространялось на всю силовую магнитную трубку. Это могло быть связано как с использованием нами достаточно коротких времен модификации ионосферы, так и с тем, что формированию дактов вдоль всей силовой линии может препятствовать горизонтальный дрейф плазмы, как это рассматривалось в [45]. Указанные причины объясняют и тот факт, что плазменные возмущения не были зарегистрированы в магнитосопряженной к стенду СУРА области ионосферы, для появления там которых, помимо всего прочего, необходим прогрев ионосферы в течение более чем одного часа [15].

Проведенные по программе СУРА–ДЕМЕТЕР эксперименты выполнялись в годы минимума солнечной активности при низком или очень низком уровнях геомагнитных возмущений. Поэтому мы ничего не можем сказать, как зависит формирование дактов от уровня естественной возмущенности ионосферной плазмы. Низкие критические частоты ионосферы над стендом СУРА на протяжении всей

миссии ИСЗ DEMETER за исключением последнего 2010 г. при минимально возможной частоте излучения стенда $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц явились причиной того, что за все это время было не слишком большое число удачных измерений. Все они приведены в таблице. Поэтому далеко не все возможные эксперименты удалось выполнить, а статистика полученных результатов была не слишком большой; в ряде случаев, как это отмечалось в обзоре и в других опубликованных работах, полученные результаты вообще носили единичный характер. Здесь остаются вопросы, требующие еще своего решения, в частности связанные с выявлением зависимости свойств дактов от состояния ионосферы и ее характеристик и с объяснением наблюдающихся вариаций температуры электронов и ионов от высоты отражения мощной радиоволны. Известно, что для передачи плазменных возмущений на большие высоты необходимы низкая частота соударений между частицами плазмы и высокая теплопроводность вдоль силовых линий геомагнитного поля. Такие условия выполняются только при высоте отражения мощной радиоволны больше 300 км [5]. Однако в наших экспериментах формирование дактов и плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы наблюдалось и при $h_{\text{ВН}} \approx 220$ км. Остается также неясным, насколько далеко такие дакты могут вытягиваться вдоль силовых линий геомагнитного поля и как при этом будут изменяться их характеристики.

Параллельно с нами исследования свойств дактов активно проводились на стенде HAARP при более высоких мощностях волны накачки и при более низких частотах ее излучения. В частности, много экспериментов было выполнено при $f_{\text{ВН}} \approx 2.8\text{--}3$ МГц, когда частота волны накачки была близка к частоте второй гармоники гирочастоты электронов в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Как показали многочисленные измерения, в этом случае генерируется искусственная ионосферная турбулентность более высокой интенсивности, что необходимо принимать во внимание при сравнении и интерпретации получаемых экспериментальных данных. Итоги выполненных на стенде HAARP исследований свойств дактов подведены в [46]. Как и в экспериментах на стенде СУРА, в них отмечается регулярность формирования дактов, показано, что днем дакты слабее, чем ночью, что их формирование наиболее эффективно при излучении волны накачки в магнитный зенит и что в ночных дактах обнаруживаются крупномасштабные неоднородности плотности плазмы. Представленные в [46] результаты численного моделирования на основе модели SAMI2 дают хорошее предсказание основных параметров дактов. В [64] на основе модели, учитывающей эффект самовоздействия мощной радиоволны, было показано, что непрерывный нагрев ионосферной плазмы, когда $f_{\text{ВН}} \approx f_{0F2}$, неэффективен из-за просачивания энергии мощной радиоволны через ионосферу

и что в таких условиях лучше использовать пульсирующий нагрев минутными импульсами. Следует, однако, отметить, что действенность такого режима излучения волны накачки ни разу не проверялась.

Хорошо известно, что эксперименты с низкоорбитальными ИСЗ имеют ряд принципиальных ограничений. В частности, с их помощью практически невозможно получить экспериментальные данные о распространении плазменных возмущений в магнитной силовой трубке от области генерации искусственной ионосферной турбулентности вблизи высоты отражения мощной радиоволны, которые имеют решающее значение для верификации предложенных моделей. В последние годы для решения этой задачи на стенде СУРА проводятся эксперименты по зондированию возмущенной магнитной силовой трубки сигналами ИСЗ навигационной системы GPS, показавшие определенную перспективность этого направления исследований [65]. С этой же целью, как и в экспериментах на стенде «Аресибо» [66], в сентябре 2014 г. и в феврале 2015 г. впервые были выполнены эксперименты по зондированию возмущенной магнитной силовой трубки сигналами харьковского радара некогерентного рассеяния с использованием полноповоротного параболического зеркала диаметром 25 м. Полученные в них данные показывают перспективность этого направления исследований.

В заключение отметим, что на территории Нижегородской области, помимо стенда СУРА, работает еще и мощный СДВ-радиопередатчик. Такое сочетание двух мощных комплексов, расположенных на расстоянии ~ 130 км друг от друга, позволяет проводить эксперименты по исследованию возможностей перенаправления энергии ОНЧ-радиоволн в магнитосферу. Это новое направление исследования околоземного космического пространства в [67] было предложено как проект «СУРА–ГОЛИАФ». При организации исследований в рамках этого проекта стенд СУРА должен использоваться для создания искусственного дакта плотности плазмы, в который будут захватываться излучаемые СДВ-передатчиком ОНЧ-волны и выводиться за пределы ионосферы в магнитосферу. Обоснование дано в [68], где показано, что комплекс СУРА–ГОЛИАФ дает уникальную возможность постановки экспериментов по управлению магнитосферным распространением ОНЧ-радиоволн. Спутниковые измерения на высотах внешней ионосферы и магнитосферы Земли здесь имеют решающее значение.

Авторы выражают благодарность сотрудникам стенда СУРА за оказанную ими помощь в проведении экспериментов. В.Л. Фролов благодарит Международный институт космических исследований (Берн, Швейцария) за предоставление площадки для обсуждения полученных результатов.

Результаты экспериментов, выполненных на стенде СУРА по программам СУРА–DEMETER

и СУРА–DMSP (2005–2012 гг.), были получены при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 05-02-16493, 08-02-00171, 11-02-00374), гранта РНФ (№ 14-12-00556) и ФЦП «Геофизика» (2011–2015 гг.). В 2017 г. работа Фролова В.Л. проводилась в рамках Государственного задания Минобрнауки РФ (шифр 3.1844.2017/ПЧ). Анализ данных ИСЗ, полученных с помощью GPS, выполнялся за счет субсидии по программе господдержки Казанского (Приволжского) федерального ун-та.

Список литературы

1. *Helliwell R.A.* Whistlers and related ionospheric phenomena. Stanford Univ. Press, Stanford, California, 1965.
2. *Walker A.D.M.* // Planet. Space Sci. 1978. **26**. P. 375.
3. *Smith R.S., Helliwell R.A., Yabroff I.W.* // J. Geophys. Res. 1960. **65**, N 3. P. 815.
4. *Карпман В.И., Кауфман Р.Н.* // Геомагн. и Аэронамия. 1983. **23**, № 3. С. 451.
5. *Gurevich A.V.* Nonlinear phenomena in the ionosphere. New York: Springer, 1978.
6. *Robinson T.R.* // Physics Reports. 1989. **179**, N 2, 3.
7. *Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н.* и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. **30**, N 2. С. 208.
8. *Stubbe P., Hagfors T.* // Surveys in Geophysics. 1997. **18**. P. 57.
9. *Гуревич А.В.* // УФН. 2007. **177**, № 11. С. 1145.
10. *Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В.* и др. // УФН. 2007. **177**, № 3. С. 330.
11. *Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н.* и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. **50**, № 7. С. 545.
12. *Иванов В.Б., Павлов Н.Н., Сидоров И.М.* // Геомагн. и аэронамия. 1980. **20**, № 1. С. 157.
13. *Борисов Н.Д., Золотарев И.П.* // Геомагн. и аэронамия. 1983. **23**, № 5. С. 797.
14. *Васьков В.В., Димант Я.С., Рябова Н.А.* и др. // Геомагн. и аэронамия. 1992. **32**, № 5. С. 140.
15. *Васьков В.В., Комраков Г.П., Рябова Н.А.* // Геомагн. и аэронамия. 1995. **35**, № 5. С. 75.
16. *Васьков В.В., Беляев П.П., Будько Н.И.* и др. // Геомагн. и аэронамия. 1993. **33**, № 6. С. 91.
17. *Vas'kov V.V., Bud'ko N.I., Kapustina O.V.* et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 1998. **60**. P. 1261.
18. *Гдалевич Г.Л., Клос З., Михайлов Ю.М.* // Геомагн. и Аэронам. 2003. **43**. С. 645.
19. *Костин В.М., Романовский Ю.А., Чмырев В.М.* и др. // Космические исследования. 1993. **31**. С. 84.
20. *Васьков В.В., Комраков Г.П., Ораевский В.Н.* и др. // Геомагн. и аэронам. 1995. **35**. С. 154.
21. *Planetary and Space Science*. 2006. **54**(5). P. 409. (Special issue).
22. *Рапопорт В.О., Фролов В.Л., Комраков Г.П.* и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. **50**, № 8. С. 709.
23. *Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. **88**, вып. 12. С. 908.
24. *Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П.* и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. **51**, № 11. С. 915.
25. *Raport V.O., Frolov V.L., Polyakov S.V.* et al. // *J. Geophys. Res.* 2010. **115**. A10322.
26. *Марков Г.А., Белов А.С., Фролов В.Л.* и др. // ЖЭТФ. 2010. **138**, вып. 6(12). С. 1037.
27. *Фролов В.Л., Митяков Н.А., Шорохова Е.А., Парро М.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. **56**, № 6. С. 361.

28. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2015. **101**, вып. 5. С. 229.
29. Гетманцев Г.Г., Зуйков Н.А., Котик Д.С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1974. **20**, вып. 4. С. 342.
30. Гуревич А.В., Зыбин К.П., Карлсон Х.С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. **48**, № 9. С. 772.
31. Фролов В.Л. // Солнечно-земная физика. 2015. **1**, вып. 2. С. 22.
32. Lebreton J.-P., Stverak S., Travnicek P. et al. // Planetary and Space Sci. 2006. **54**(5). P. 472.
33. Berthelier J.J., Godefroy M., Leblanc F. et al. // Planetary and Space Sci. 2006. **54**(5), P. 487.
34. Berthelier J.J., Godefroy M., Leblanc F. et al. // Planetary and Space Sci. 2006. **54**(5). P. 456.
35. Parrot M., Benoist D., Berthelier J.J. et al. // Planetary and Space Sci. 2006. **54**(5). P. 441.
36. Sauvaud J.A., Moreau T., Maggiolo R. et al. // Planetary and Space Sci. 2006. **54**(5). P. 502.
37. Фролов В.Л., Болотин И.А., Рапопорт В.О. и др. // XXIV Всеросс. науч. конф. «Распространение радиоволн». Иркутск, 2014. Сб. докл. **3**. С. 116.
38. Gulyaeva T.L., Stanislawska L. // Ann. Geophysicae. 2008. **26**. P. 2645.
39. Давыдов В.Е., Зинкина М.Д., Писанко Ю.В. // Гелиогеофизические исследования. 2015. Вып. 12, С. 11.
40. Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокуров В.Д., Чернобровка Н.А. Явление F-рассеяния в ионосфере. М.: Наука, 1984.
41. Frolov V.L., Sergeev E.N., Ermakova E.N. et al. // Geophys. Res. Lett. 2001. **28**, N 16. P. 3103.
42. Leyser T.B. // Space Sci. Rev. 2001. **98**. P. 223.
43. Blagoveshchenskaya N.F., Carlson H.C., Kornienko V.A. et al. // Ann. Geophys. 2009. **27**. P. 131.
44. Milikh G.M., Papadopoulos K., Shroff H. et al. // Geophys. Res. Lett. 2008. **35**. L17104
45. Fallen C.T., Secan J.A., Watkins B.J. // Geophys. Res. Lett. 2011. **38**. L08101.
46. Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E. et al. // J. Geophys. Res. 2012. **117**. A10307.
47. Айдакина Н.А., Гуцин М.Е., Зудин И.Ю. и др. // XXIV Всеросс. науч. конф. «Распространение радиоволн». Иркутск, 2014. Сб. докл. **3**. С. 25.
48. Титова Е.Е., Ди И.И., Иржичек Ф. и др. // Геомагн. и аэрономия. 1984. **24**, № 6. С. 935.
49. Трахтенгерц В.Ю., Титова Е.Е. // Геомагн. и аэрономия. 1985. **25**, № 1. С. 89.
50. Groves K.M., Lee M.C., Kuo S.P. // J. Geophys. Res. 1988. **93**, N A12. P. 14683.
51. Титова Е.Е., Демехов А.Г., Молчанов А.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. **58**, № 3. С. 167.
52. Parrot M., Sauvaud J.A., Berthelier J.J., Lebreton J.P. // Geophys. Res. Lett. 2007. **34**. L11111.
53. Fialer P.A. // Radio Sci. 1974. **9**, N 11. P. 923.
54. Haslett J.C., Megill L.R. // Radio Sci. 1974. **9**, N 11. P. 1005.
55. Vartanyan A., Papadopoulos K., Parrot M. et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2011. **73**, N 13. P. 1674.
56. Huba J.D., Joyce G., Fedder J.A. // J. Geophys. Res. 2000. **105**, N A10. P. 23035.
57. Белов А.С., Марков Г.А., Рябов А.О., Парро М. // ЖЭТФ. 2012. **142**, вып. 6(12). С. 1246.
58. Белов А.С. // ЖЭТФ. 2015. **148**, вып. 4(10). С. 758.
59. Rietveld M.T., Kosch M.J., Blagoveshchenskaya N.F. et al. // J. Geophys. Res. 2003. **108**. N A4. P. 1141
60. Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Borisova T.D. et al. // Adv. Space Res. 2006. **38**, N 11. P. 2495.
61. Milikh G.M., Mishin E., Galkin I. et al. // Geophys. Res. Lett. 2010. **37**. L18102.
62. Kosch M.J., Ogawa Y., Rietveld M.T. et al. // J. Geophys. Res. 2010. **115**. A06325.
63. Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Frolov V.L. et al. // Radio Sci. 2012. **47**. RS0L15.
64. Milikh G.M., Demekhov A., Vartanyan A. et al. // Geophys. Res. Lett. 2012. **39**. L10102
65. Фролов В.Л., Комраков Г.П., Глухов Я.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. **59**. № 2. С. 91.
66. González S.A., Nicolls M.J., Sulzer M.P., Aponte N. // J. Geophys. Res. 2005. **110**. A11303.
67. Polyakov S.V., Kononov Yu.M., Shchors Yu.G. et al. // VII International Suzdal URSI Symposium «Modification of the ionosphere by powerful radio waves». Moscow, October 16–18, 2007. Book of Abstracts. P. 54.
68. Поляков С.В., Рапопорт В.О. // XXII Всероссийская конференция по распространению радиоволн. Ростов-на-Дону, 2008. Тр. конф. **2**. С. 198.

The results of measurements of features of artificial electromagnetic and plasma perturbations in the outer ionosphere of the Earth using the DEMETER satellite

V. L. Frolov^{1,2,a}, V. O. Rapoport¹, E. A. Shorokhova¹, M. Parrot³, J.-L. Rauch³

¹Radiophysical Research Institute. N. Novgorod 603950, Russia.

²Kazan State University. Kazan 420008, Russia.

³Environment Physics and Chemistry Laboratory (LPCE). 45071 Orléans cedex, France.

E-mail: ^adelitsyn@mail.ru.

The results of the DEMETER satellite mission for 2005–2010 are summarized. The characteristics of electromagnetic and plasma perturbations induced in the F_2 layer of the Earth's ionosphere by the high-power HF radio waves from the SURA heating facility are analyzed.

Keywords: ionosphere, SURA facility, HF heating, artificial ionospheric irregularities.

PACS: 42.62.Cf, 42.30.-d.

Received 25 December 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2018. **72**, No. 1. Pp. 17–40.

Сведения об авторах

1. Фролов Владимир Леонтьевич — доктор физ.-мат. наук, зав. сектором; e-mail: frolov@nirfi.unn.ru.
2. Рапопорт Виктор Овсеевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией.
3. Шорохова Елена Анатольевна — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник.
4. Parrot Michel — Dr. Prof., principal investigator, Environment Physics and Chemistry Laboratory (LPCE).
5. Rauch J.L. — Dr., principal investigator, Environment Physics and Chemistry Laboratory (LPCE).