УДК 533.951+537.868

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ИНДУЦИРУЕМЫХ НА ВЫСОТАХ ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПРИ МОДИФИКАЦИИ *F*₂-ОБЛАСТИ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА «СУРА»

В. Л. Фролов ^{1,2} *, В. О. Рапопорт ¹, Е. А. Шорохова ¹, А. С. Белов ³, М. Парро ⁴, Ж.-Л. Рош ⁴

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород;
 ² Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань;
 ³ Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия
 ⁴ Environment Physics and Chemistry Laboratory (LPCE), Орлеан, Франция

В работе систематизированы результаты проведённых в 2005–2010 годах за время работы спутника DEMETER исследований характеристик дактов концентрации плазмы. Дакты формируются на высотах около 700 км при модификации F₂-области ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением среднеширотного нагревного стенда «Сура». На основе всех выполненных измерений определены условия образования таких дактов, изучены их характеристики и продемонстрированы возможности их влияния на ионосферно-магнитосферные связи и распространение радиоволн различных частотных диапазонов. Приведены результаты численного моделирования образования таких дактов.

ВВЕДЕНИЕ

Определение условий формирования во внешней ионосфере и магнитосфере Земли вытянутых вдоль линий геомагнитного поля крупномасштабных интенсивных неоднородностей концентрации плазмы (дактов) является важной задачей современных геофизических исследований. Её решение имеет различные области применения, включая модификацию магнитосферной плазмы очень низкочастотными (ОНЧ) и низкочастотными (НЧ) радиоволнами, распространяющимися в таких дактах (на то, что дакты могут служить каналами для распространения радиоволн ОНЧ диапазона (вистлеров), указывалось ещё в работе [1]). Механизмы формирования дактов в естественной ионосфере рассматривались, например, в работе [2]. В статьях [3, 4] было показано, что для каналирования вистлеров в дактах необходимо, чтобы концентрация плазмы в них была больше, чем в окружающей среде.

Одним из способов создания дактов может служить модификация F_2 -области ионосферы мощными короткими радиоволнами с О-поляризацией, когда вблизи уровня их отражения происходит генерация интенсивной искусственной ионосферной турбулентности, развитие возмущений концентрации плазмы с различными масштабами от долей метра до десятков километров и сильный разогрев электронов плазмы [5–8]. Возможности создания дактов концентрации при модификации ионосферы мощными радиоволнами теоретически рассматривались в работах [9–11]. В статье [12] 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 концентрации плазмы на магнитосферных высотах.

^{*} frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru

Первые исследования свойств плазменной турбулентности, индуцируемой во внешней ионосфере Земли при модификации её F₂-области излучаемыми стендом «Сура» (НИРФИ, г. Нижний Новгород) мощными радиоволнами с О-поляризацией, проводились в 1992–1993 годах с использованием бортовой аппаратуры нескольких спутников [13–16]. Однако следует отметить, что эти эксперименты носили единичный характер и, кроме того, спутники не были оснащены всем необходимым оборудованием для полного изучения характеристик наблюдаемых явлений.

В данной работе мы представляем обзор результатов исследований свойств возбуждаемых во внешней ионосфере искусственных плазменных возмущений, выполненных в 2005–2010 годах (в периоды с апреля по октябрь) с помощью бортовой аппаратуры французского микроспутника DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions). Некоторые из этих результатов были опубликованы в работах [17–22]. Спутник был запущен на круговую солнце-синхронную полярную орбиту с наклонением 98,3° и высотой около 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. Детальное описание бортовой аппаратуры спутника приведено в журнале [23]. Отметим, что практически все измерения были выполнены в годы затянувшегося минимума солнечной активности в спокойных или очень спокойных геомагнитных условиях.

Нагревный стенд «Сура» расположен в 120 км к востоку от г. Нижний Новгород (точные географические координаты 56,15° с. ш., 46,1° в. д.). Эффективная мощность излучения стенда в режиме синхронного излучения всех его трёх модулей составляет 80 МВт на частоте излучения $f_{\rm BH} \approx 4\,300$ кГц и 280 МВт на частоте $f_{\rm BH} \approx 9\,300$ кГц, монотонно увеличиваясь с ростом частоты $f_{\rm BH}$. Подробное описание стенда приведено в работе [24].

Одним из наиболее значимых результатов, полученных в рамках программы «Сура»—DEMETER, является обнаружение формирования на высотах внешней ионосферы дактов с увеличенной концентрацией плазмы с размерами поперёк линий геомагнитного поля около 80÷100 км [17, 18]. Детальное рассмотрение характеристик этих дактов и условий их образования с учётом всех полученных с помощью спутника DEMETER экспериментальных данных является основной целью данной работы. Кроме того, в работе на основе результатов выполненных экспериментов продемонстрировано влияние таких дактов на локальные ионосферно-магнитосферные связи и распространение радиоволн различных частотных диапазонов.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Организация измерений, итоговая таблица результатов

При проведении экспериментов по созданию искусственных плазменных возмущений в ионосфере Земли использовались мощные радиоволны с О-поляризацией. Стенд «Сура» включался на 15 мин примерно за 13 мин до пролёта спутника над ним. Согласно работам [6, 8, 13–16] это время является достаточным для развития искусственной ионосферной турбулентности до практически стационарного уровня не только в области отражения волны накачки, но и на высотах внешней ионосферы. В случае, когда спутник находился в магнитосопряжённой к стенду области ионосферы, длительность излучения мощной радиоволны во время измерений 2010 года была увеличена до 40 мин, чтобы обеспечить более полное возбуждение плазменных возмущений во всей магнитной силовой трубке.

Всего по программе «Сура»—DEMETER в 2005–2010 годах было выполнено около 200 экспериментов. Не было зарегистрировано каких-либо искусственных плазменных возмущений в следующих случаях: при работе стенда в дневные часы (это связано с высоким поглощением

радиоволн в нижней ионосфере и дефокусировкой мощной радиоволны [25]); в случае, когда частота мощной радиоволны превышала критическую частоту f_{0F_2} слоя ионосферы F_2 ; когда эффективная мощность излучения волны накачки была ниже 40 MBT; а также когда орбита спутника проходила на расстоянии больше 100 км от центра возмущённой магнитной силовой трубки (для регистрации дактов это расстояние не должно превышать 50 км). Дополнительно отметим, что бортовой аппаратурой спутника ни разу не был зарегистрирован низкочастотный сигнал, отвечающий частоте амплитудной модуляции мощной радиоволны и появляющийся вследствие эффекта Гетманцева [26]. Не были зарегистрированы также какие-либо значимые плазменные или электромагнитные возмущения в магнитосопряжённой к стенду «Сура» области ионосферы.

С учётом вышесказанного, в табл. 1 представлены данные наблюдений, полученные только в те сеансы, когда нагрев ионосферы проводился в вечерние часы при $f_0 \leq f_{0F_2}$ и с эффективной мощностью излучения P_{эфф} ≥ 40 MBт при условии, что минимальное расстояние между орбитой спутника и центром возмущённой трубки не превышало 100 км. За 6 лет измерений было всего 25 сеансов, удовлетворяющих таким требованиям. В табл. 1 дополнительно включены ещё 3 сеанса (сеансы 4, 26 и 28), когда выполнялось условие $f_{\rm BH} > f_{0F_2}$ (нагрев на просвет), результаты которых использовались при изучении прохождения мощной радиоволны во внешнюю ионосферу. Заметим, что все времена в табл. 1 даны в UT; для приведённых в табл. 1 сеансов измерений T_{UT} = T_{MSK} - 4 ч. В первом столбце табл. 1 указан номер сеанса; во втором столбце приведены дата проведения измерений, время минимального сближения спутника с центром возмущённой магнитной силовой трубки T^* и минимальное расстояние до её центра D^* ; в третьем — время излучения волны накачки, её частота $f_{\rm BH}$ и эффективная мощность $P_{\rm эф\phi}$, а также угол наклона α диаграммы направленности (к югу) излучающей антенны стенда. В четвёртом столбце представлены сведения об условиях проведения измерений: критическая частота f_{0F_2} , высота отражения волны накачки и суммарный за сутки $K_{\rm p}$ -индекс ($\Sigma K_{\rm p}$) в день измерений. В пятом столбце для сеансов, в которых регистрировался дакт концентрации плазмы на высоте орбиты спутника, приведены максимальное изменение концентрации плазмы в дакте $\delta N_{\rm max}$ относительно концентрации окружающей плазмы, время регистрации дакта и время, когда изменение концентрации плазмы в дакте было максимальным. Увеличение концентрации плазмы в дакте определялось по показаниям ленгмюровского зонда (ISL) для концентрации её электронной компоненты $N_{\rm e}$ и по показаниям ионного датчика IAP для концентрации ионов кислорода N_{O⁺}, которые являются основными на высотах порядка 700 км (относительное увеличение для $N_{\rm O^+}, \, \delta N_{\rm O^+},$ в табл. 1 приведено в скобках). Из табл. 1 видно, что $\delta N_{\rm O^+}$ в дакте может существенно отличаться от соответствующего значения $\delta N_{\rm e}$. Согласно консультациям с разработчиками спутника, более точными следует считать данные измерений для $N_{\rm e}$, поскольку на результаты измерений с помощью ионного датчика сильное влияние может оказывать потенциал спутника. В последней шестой колонке указано, какие параметры электромагнитных и плазменных возмущений регистрировались при модификации ионосферы мощным радиоизлучением. В этой же колонке отмечено появление отклика от сигнала волны накачки на одной из боковых частот её спектрального преобразования. Это связано с тем, что для используемых на стенде «Сура» частот $f_{\rm BH} \ge 4.3~{
m M}$ Гц сигнал волны накачки не мог быть прямо измерен ввиду ограниченности полосы пропускания измерителя электрического поля ICE (примерно 3,175 МГц). Однако в спектре принимаемого оцифрованного сигнала имеется сигнал на боковой частоте $f_{\text{бок}} = 6\,666\,\,\mathrm{k}\Gamma\mathrm{u} - f_{\text{BH}}$, характеристики которого в определённой мере отражают характеристики сигнала на частоте волны накачки (здесь частота 6 666 кГц — частота оцифровки измерителя напряжённости электрического поля ICE) [21]. В шестой колонке также приводятся данные о потоке энергичных (с энергиями 70 кэВ÷2,5 МэВ) электронов, отмечается наличие эффекта уширения спектра сигналов сверхдлинноволновых (СДВ) радиостанций внутри дакта, и указаны частоты этих станций.

В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Е. А. Шорохова и др.

						Таблица 1
ĺ	N⁰	дата $/T^*(\mathrm{UT})/D^*$	время	$f_{0F_2}/h_{\rm orp}/\Sigma K_{\rm p}$	$\delta N_{ m e} (\delta N_{ m O^+})/$ время	комментарии
			нагрева (UT) $/f_{\rm BH}/P_{\rm solpha}/\alpha$	_	регистрации дакта (UT)/	
					$I_{\max}(\mathrm{UT})$	
Í	1	30.04.2005/	$18:15:00 \div 18:30:00/$	5,2 МГц/287 км/30	$33\%(14\%)/18{:}25{:}32{\div}$	вариации параметров $N_{\rm e}, N_{\rm i}, T_{\rm e}, V_{\rm i};$
		18:25:36/26 км	$4600 \mathrm{k}\Gamma \mathrm{u}/100 \mathrm{MBt}/12^{\circ}$		$\div 18:25:43/18:25:38$	усиление электрических полей в дакте
						в полосе до 2÷4 кГц; спектр
						энергичных электронов невозмущён; есть
						излучение на частоте $f_{\text{бок}} = 2066\mathrm{k}\Gamma\mathrm{u};$
						уширение спектра СДВ сигнала
						на частоте 19,8 кГц
	2	25.05.2005/	$18:09:00 \div 18:34:00/$	$6,6~{ m M}{\Gamma}$ ц/246 км/7	-	слабые вариации параметров $N_{\rm i}$ и $V_{\rm z}$;
		18:19:54/67км	$5828\ \kappa\Gamma$ ц/150 $MB_T/0^{\circ}$			есть излучение на частоте $f_{\rm fork} = 838~{ m k}\Gamma{ m g}$
	3	13.08.2005/	$18:10:00\div18:25:00/$	4,4 МГц/268 км/23	-	вариации концентраций $N_{\rm e}, N_{\rm i}$ южнее
		18:20:43/40 км	$4300~{ m \kappa}\Gamma{ m u}/40~{ m MBt}/0^{\circ}$			центра диаграммы направленности
	4	5.09.2005/	$18:16:00 \div 18:31:00/$	3,6 M Γ µ/-/20+	-	плазменных возмущений не обнаружено;
		18:26:41/73км	$4300\ \kappa\Gamma$ ц/80 $MB_T/0^\circ$			есть излучение на частоте $f_{\rm fork} = 2366~{\rm k}\Gamma$ ц
	5	18.04.2006/	$18:12:00 \div 18:27:00/$	4,4÷3,9 МГц/	-	плазменных возмущений не обнаружено;
		18:22:59/5 км	$4300~{ m \kappa}\Gamma{ m u}/80~{ m MBt}/0^{\circ}$	240 км/12		излучение на частоте $f_{\rm fork} = 2366~{ m k}\Gamma$ ц
	6	1.05.2006/	$18:18:00 \div 18:33:00/$	5,8 МГц/230 км/2 $+$	$27\%(31\%)/18{:}28{:}40{\div}$	изменение значений N _e , N _i , T _e , T _i ; усиление
		18:28:39/35км	$4300~{ m \kappa}\Gamma{ m u}/80~{ m MBt}/12^{\circ}$		$\div 18:28:49/18:28:44$	электрических полей в дакте в полосе
						$0\div 2$ кГц и в полосе $6\div 16$ кГц;
						спектр энергичных электронов невозмущен;
						уширение спектра СДВ сигналов
						на частотах 19,8; 18,1 и 14,8 кГц
	7	4.05.2006/	18:12:00÷18:27:00/	5,3 МГц/240 км/20	—	плазменных возмущений не обнаружено
		18:22:34/65 км	4 300 кГц/80 MBт/12°			
	8	17.05.2006/	18:18:00÷18:33:00/	5,9 МГц/220 км/10	$27\%(56\%)/18:28:31\div$	вариации параметров $N_{\rm e}, N_{\rm i}, T_{\rm e}, T_{\rm i}, V_{\rm i};$
		18:28:34/39 км	4785 кГц/120 МВт/12°		18:28:42/18:28:36	усиление электрических полей в дакте
						в полосе до 2÷4 кі ц; спектр
						энергичных электронов невозмущен;
						уширение спектра СДВ сигналов
	0	20.05.200C/	10.10.00 • 10.07.00 /	5 7 ME- /005 /10		на частотах 19,8, 18,1 и 14,8 кн ц
	9	20.05.2000/	$18:12:00 \div 18:27:00/$	5,7 МП Ц/225 КМ/12-	_	вариации параметров N _e и I _e ; усиление
		18:22:31/08 KM	5455 KI Ц/150 МВТ/12 ⁻			электрических полеи в дакте в полосе
						$f = 1.211 \text{ y} \Gamma \text{y}$
						$J_{60K} = 1211$ КI Ц, спектр энергичных
						СЛВ сигналов на настотах 10.8 18.1
						и 14.8 кГи
	10	24 08 2006 /	18.12.00-18.27.00/	4.5 MFH/245 KM/0	_	п 13,0 кг ц
	10	18·22·26/55 KM	4300 κΓπ/80 MBτ/12°	4,0 MII 4/240 KM/9	_	есть излучение на частоте $f_{c_{1}} = 2366 \text{ к} \Gamma \mu$
	11	5.04.2007/	18:12:00 ± 18:27:00 /	$5.5 \text{ MFu}/_{-}/7$	_	плазменных возмушений не обнаружено.
	11	18·22·30/43 KM	$5480 \mathrm{k} \mathrm{Fu} / 150 \mathrm{MBr} / 19^{\circ}$	0,0 mit ц/-/ /	_	изпучение на частоте $f_{c} = 1.186 \text{ к} \Gamma \mu$
	12	7.05.2007/	18:16:00-18:26:00/	$< 4.6 \text{ MGm}/270 \text{ km}/21 \pm$	_	плазменных возмушений не обнаружено.
	14	18:22:38/34 км	4785 κΓμ/120 MBT/12°		_	есть излучение на частоте $f_{form} = 1.881$ кГи

13	24.08.2007/	$18:19:00\div18:34:00/$	4,7 МГц/240 км/2	_	плазменных возмущений не обнаружено;
	18:29:42/125 км	4 300 кГц/80 MBт/12°		—	есть излучение на частоте $f_{\rm fork} = 2366~{ m k}\Gamma$ ц
14	30.08.2007/	$18:13:00\div18:28:00/$	4,3 МГц/260 км/8+	—	плазменных возмущений не обнаружено;
	18:17:41/64 км	4 300 кГц/80 MBт/12°		—	есть излучение на частоте $f_{\rm fork} = 2366~{ m k}\Gamma$ ц
15	12.05.2008/	$18:05:00 \div 18:20:00/$	5,0 МГц/220 км/6-	$42\%~(73\%)/18:16:21\div$	вариации параметров $N_{\rm e}, N_{\rm i}, T_{\rm e}, V_{\rm i}$; усиление
	18:16:28/21 км	4300 кГц/80 MBт/12°		$\div 18:16:36/18:16:29$	электрических полей в полосе до 1 кГц и более
					слабое усиление в полосе до > 20 к Γ ц;
					усиление магнитных полей в полосе до 500 Гц;
					есть излучение на частоте $f_{60K} = 2366\mathrm{k\Gamma u};$
					увеличение энергии и потока энергичных
					электронов в дакте; уширение спектра СДВ
					сигналов на частоте 19,8 кГц
16	28.05.2008/	$18:00:00 \div 18:21:00/$	4,7 МГц/240 км/19	$42\%~(25\%)/18:16:27\div$	вариации параметров $N_{\rm e}, N_{\rm i}, T_{\rm e}, V_{\rm i}$; усиление
	18:16:28/40 км	4300 κΓц/80 MBt/ 12°		$\div 18:16:39/18:16:33$	электрических полей в полосе до 460 Гц и более
					слабое усиление в полосе до 18 кГц;
					усиление магнитных полей в полосе до 200 Гц
					и более; слабое усиление в полосе до 500 Гц;
					есть излучение на частоте $f_{\text{бок}} = 2366 \text{ кГц};$
					увеличение энергии и потока энергичных электронов
	24.05.0000/				в дакте
17	31.05.2008/	$17:55:00 \div 18:15:00/$	4,6 МГц/236 км/17-	_	плазменных возмущений не обнаружено;
10	18:10:30/88 км	4 300 Kl u/80 MBT/12°	4.9 ME /050 /11		есть излучение на частоте $f_{60\kappa} = 2.366 \text{ кГц}$
18	27.08.2009/	$17:53:00 \div 18:08:00/$	4,3 МГц/270 км/11	$15 \% (77 \%) / 18:03:36 \div$	вариации параметров $N_{\rm e}$, $N_{\rm i}$, $T_{\rm e}$, $T_{\rm i}$, $V_{\rm i}$;
	18:03:47/39 км	4 300 кі ц/40 МВт/0°		18:03:53/18:03:43	усиление электрических полеи в полосе до 2001 ц
					и более слабое усиление в полосе до 1 кl ц;
					есть излучение на частоте $f_{60K} = 2300$ кI ц;
					спектр энергичных электронов невозмущен;
10	18.04.2010/	17:25:00 : 17:55:00 /	4 7 MFr /260 m /5	$19\%(25\%)/T_{17.52.52}$	уширение спектра СДВ сигналов на частоте 14,8 кг ц
19	16.04.2010/ 17.54.02/25 m/	$4200 \text{ w} \text{Fr} / 40 \text{ MPm} / 12^{\circ}$	4,7 МПЦ/200 КМ/3-	$10 / 0(33 / 0) / 1 = 17.53.52 \div$	двоиной дакт, вариации параметров $N_{\rm e}$, i, $I_{\rm e}$, $I_{\rm i}$, $V_{\rm i}$,
	17.04.00/20 KM	4 300 KI II/40 MDT/12		÷17.54.09/17.54.01	усиление электрических полеи в полосе до $2-4$ кг ц,
				7%(13%)/17.54.09	спектр энергицных электронов нерозмицён:
				17.54.20/17.54.15	уширение спектра СЛВ сигнала на частоте 18.1 кГи
20	28.04.2010/	17.15.00-17.55.00/	5.7 MFu/225 km/6+		плазменных возмущений не обнаружено
20	18:01:13/105 км	4300	0,1 MI I/ 220 KM/ 0		плазменных возмущении не обнаружено
21	14.05.2010/	$17:40:00 \div 17:52:30$	6.0 МГи/235 км/5-	14%(24%)/17:53:02-	лакт наблюлался южнее центра возмущённой трубки:
	17:53:13/28 км	4785 κΓμ/90 MBτ/12°	0,0 111 1, 200 1117 0	17:53:12/17:53:07	вариации параметров No. N: To. V::
					усиление электрических полей в полосе до 400 Ги-
					спектр энергичных электронов невозмушён:
					уширение спектра СДВ сигналов на частотах 18.1
					и 19.8 кГц
			l		- / - 1

	—	плазменных возмущений не обнаружено
5,8 МГц/250 км/2		
5,3 МГц/250 км/4	$22\%(17\%)/17:52:34\div$	вариации параметров $N_{\rm e}, N_{\rm i}, T_{\rm e}, V_{\rm i};$
	17:52:42/17:52:36	усиление электрических полей в полосе до 2 кГц;
		есть излучение на частоте $f_{\text{бок}} = 1881$ кГц;
		спектр энергичных электронов невозмущён;
		уширение спектра СДВ сигналов на частоте 19,8 кГц
5,1 МГц/250 км/5+	_	плазменных возмущений не обнаружено;
		естественное противофазное изменение концентраций
		$N_{\rm H}^+$ и $N_{\rm O}^+$
5,6 МГц/245 км/9	—	плазменных возмущений не обнаружено;
		естественное противофазное изменение концентраций
		$N_{\rm H}^+$ и $N_{\rm O}^+$
3,7÷3,9 МГц/ – /8+	$10\%(15\%)/17{:}51{:}30{\div}$	наблюдался дакт наблюдался с небольшим провалом
	17:51:55/17:51:37	посередине; вариации параметров $N_{\rm e}, N_{\rm i}, T_{\rm e}, V_{\rm i};$
		усиление электрических полей в полосе до 1,0 кГц
		и более слабое усиление в полосе 12÷16 кГц;
		есть излучение на частоте $f_{\text{бок}} = 2366$ кГц:
		спектр энергичных электронов невозмущён;
		уширение спектра СДВ сигналов на частотах
		16,4, 18,1 и 19,8 кГц
5,2 МГц/225 км/8+	—	плазменных возмущений не обнаружено;
		усиление электрических полей в полосе до 0,4 кГц;
		есть излучение на частоте $f_{\text{бок}} = 1926$ кГц;
		усиление потока энергичных частиц;
		наклонные спектры СДВ станций на частоте 18,1 кГц
3,7 МГц/-/2+	$-13\%(-)/17:50:32\div$	плазменных возмущений не обнаружено;
	17:50:49/17:53:07	усиление электрических полей в полосе до 1 кГц
		(но раньше дакта, где имело место усиление сигнала
		на боковой частоте; здесь же оно связано с уширением
		спектра СДВ сигналов); есть излучение на частоте
		$f_{\rm fok} = 1881{\rm k}\Gamma$ ц; спектр энергичных электронов

невозмущён; наклонные спектры СДВ станций на частотах 16,4 и 18,1 кГц

В. Л. Фү
юлов,
В.
0
$P_{\mathbf{Q}}$
an on opm,
E.
A.
Шорохова
u
∂p .

22

23

24

25

26

27

28

24.05.2010/

18:00:20/102 км

27.05.2010/

17:52:42/27 км

19.06.2010/ 17:58:56/95 км

22.06.2010/

17:51:15/37 км

18.09.2010/

17:51:44/27км

21.09.2010/ 17:43:59/105 км

1.10.2010/

17:50:27/15 км

17:50:00÷17:58:00/

4785 кГц/70 MBт/12°

 $17:35:00 \div 17:50:00$

4785 кГц/70 MBт/12°

 $17:39:00 \div 17:59:00$

 $4\,300\ \kappa\Gamma$ ц/40 MBt/12°

 $17:31:00 \div 17:51:00$

4785 кГц/40 МВт/12°

 $16:20:00 \div 17:52:00$

4300 кГц/50 MBт/12°

17:19:00÷17:45:00

4740 κ Γ ц/105 MBt/12°

 $17:20:00 \div 17:52:00$

4785 кГц/80 $MBT/12^{\circ}$

Известия вузов. Радиофизика



Рис. 1. Изменение концентрации электронов $N_{\rm e}(a)$, ионов кислорода $N_{\rm O^+}(a)$ и водорода $N_{\rm H^+}(d)$, а также измерения температуры электронов $T_{\rm e}(b)$, температуры ионов $T_{\rm i}(c)$ и компоненты скорости ионов V_z , направленной в противоположном к вектору скорости спутника направлении (e). Сеанс 6, 01.05.2006

1.2. Примеры выполненных измерений

Как следует из табл. 1, за всё время проведения измерений только в 11 сеансах (сеансы 1, 6, 8, 9, 15, 16, 18, 19, 21, 23, 26) было зарегистрировано формирование искусственных дактов, причём всегда с повышенной концентрацией плазмы. Подобные структуры не обнаруживались в контрольных сеансах, когда спутник пролетал над неработающим стендом, или когда нагрев ионосферы осуществлялся в режиме «на просвет» при $f_{\rm BH} > f_{0F_2}$.

В качестве примеров рассмотрим результаты измерений для трёх сеансов, проведённых 1 мая 2006 года (сеанс 6), 12 мая 2008 года (сеанс 15) и 18 апреля 2010 года (сеанс 19). Сеансы были подобраны таким образом, чтобы дать наиболее полное представление о характере искусственных плазменных и электромагнитных возмущений, индуцируемых на высотах примерно 660 км при модификации ночной среднеширотной F_2 -области ионосферы мощными короткими радиоволнами с О-поляризацией.

1.2.1. Сеанс 1 мая 2006 года

В этом сеансе мощная радиоволна излучалась с 18:18 до 18:33 UT на частоте $f_{\rm BH} = 4\,300$ кГц ($f_{0F_2} \approx 5,8$ МГц) с мощностью $P_{\rm sdep} = 80$ МВт с наклоном диаграммы направленности на 12° на юг; высота отражения волны накачки составляла примерно 230 км. Следовательно, модификация ионосферы осуществлялась в условиях, когда частота волны накачки была на 1,5 МГц ниже частоты f_{0F_2} . Измерения выполнялись в очень спокойных геомагнитных условиях, $\Sigma K_{\rm p} = 2^+$. Минимальное расстояние между орбитой спутника и центром возмущённой магнитной силовой трубки составляло 35 км для $T^* = 18:28:39$ UT.

В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Е. А. Шорохова и др.

На рис. 1 показано изменение концентрации электронов $N_{\rm e}$ (a), ионов кислорода $N_{\rm O^+}$ (b) и ионов водорода $N_{\rm H^+}$ (∂), а также приведены измерения температуры электронов $T_{\rm e}$ (б), температуры ионов $T_{i}(s)$ и компоненты скорости ионов $V_{z}(e)$, направленной в противоположном скорости спутника направлении. На оси абсцисс приведены координаты орбиты спутника и времена, когда он в них находился. По результатам измерений концентрации N_e и N_O+ видно формирование дакта с увеличенной концентрацией плазмы (примерно на 27% по данным ленгмюровского зонда ISL и на 31% по данным ионного датчика IAP для N_{O^+}). Дакт обнаруживался с 18:28:40 до 18:28:49 UT с максимумом приращения концентрации в дакте в 18:28:44 UT. Это позволяет



Рис. 2. Спектрограмма вариаций интенсивности электрического поля J_E в диапазоне 15 Гц \div 20 кГц. Сеанс 6, 01.05.2006

оценить размер дакта вдоль орбиты спутника (приблизительно в северо-южном направлении) как 70 км. Согласно результатам измерений, полученных с помощью анализатора плазмы и ленгмюровского зонда, в этом сеансе в дакте наблюдалось уменьшение концентрации наиболее лёгких ионов водорода $N_{\rm H^+}$ почти в 3 раза (см. рис. 1*д*), уменьшение концентрации ионов гелия более чем в 30 раз (здесь не показано), увеличение температуры электронов примерно на 7 % (см. рис. 1*б*) и уменьшение температуры ионов на 10 % (см. рис. 1*г*). Не было отмечено каких-либо вариаций вектора скорости ионов (см. рис. 1*е*). Амплитуда вариаций магнитного поля в этом сеансе, как и во многих других, не превышала 1 нТл, т. е. была фактически на уровне шумов аппаратуры. Также внутри дакта не обнаруживались заметные вариации концентрации и температуры плазмы с масштабами в несколько десятков километров поперёк линий геомагнитного поля и какие-либо изменения в потоке энергичных (с энергией $\varepsilon \geq 70$ кэВ) электронов.

На рис. 2 приведена спектрограмма вариаций одной из компонент электрического поля в диапазоне 15 Гц÷20 кГц (более затемнённые участки рисунка отвечают большей интенсивности сигнала). Хорошо видно, что в дакте имеет место сильное увеличение флуктуаций электрического поля в диапазоне частот до 2 кГц; увеличение интенсивности шумов в диапазоне частот 6÷16 кГц, что приводит к размытию границы нижнегибридных шумов; уширение спектра СДВ сигналов, особенно на частоте 18,1 кГц (до ±500 Гц) и слабее на частотах 19,8 и 14,8 кГц (см. также раздел 2.3).

Сигнал на боковой частоте 2 366 кГц в этом сеансе не регистрировался. Следовательно, не наблюдалось просачивания мощности волны накачки во внешнюю ионосферу. Это связано с большой разницей между частотой $f_{\rm BH}$ и критической частотой f_{0F_2} (подробнее см. раздел 2.4).

1.2.2. Сеанс 12 мая 2008 года

В этом сеансе мощная радиоволна излучалась с 18:05 до 18:20 UT на частоте $f_{\rm BH} = 4\,300$ кГц ($f_{0F_2} \approx 5,0$ МГц) с мощностью $P_{9\phi\phi} = 80$ МВт с наклоном диаграммы направленности 12° на юг; высота её отражения составляла примерно 220 км. Следовательно, модификация ионосферы осуществлялась в условиях, когда частота волны накачки была на 0,7 МГц ниже f_{0F_2} . Измерения выполнялись в очень спокойных геомагнитных условиях: $\Sigma K_{\rm p} = 6^-$. Минимальное расстояние между орбитой спутника и центром возмущённой магнитной силовой трубкой составляло 21 км для $T^* = 18:16:28$ UT.



Рис. 3. Изменение концентрации электронов $N_{\rm e}$ (*a*), ионов кислорода $N_{\rm O^+}$ (*b*) и водорода $N_{\rm H^+}$ (*d*), а также измерения температуры электронов $T_{\rm e}$ (*b*), температуры ионов $T_{\rm i}$ (*c*) и компоненты скорости V_z (*e*). Сеанс 15, 12.05.2008

На рис. 3 приведено изменение концентрации электронов $N_{\rm e}$ (a), ионов кислорода $N_{\rm O^+}$ (b) и ионов водорода $N_{\rm H^+}$ (d); более детально характер изменения концентрации ионов показан на рис. 4. На рис. 3 также показаны результаты измерения температуры электронов $T_{\rm e}$ (δ), температуры ионов $T_{\rm i}$ (*г*) и компоненты скорости V_z (*e*). Из результатов измерений концентраций $N_{\rm e}$ и N_{O^+} видно формирование дакта с увеличенной концентрацией плазмы: на $42\,\%$ по данным измерений $N_{\rm e}$ и на 73 % по данным измерений $N_{\rm O^+}$. Дакт регистрировался с 18:16:21 до 18:16:36 UT, что даёт оценку его размера вдоль орбиты спутника в 110 км. Из полученных данных следует (см. рис. 4), что вместе с увеличением концентрации ионов О⁺ наблюдается уменьшение концентрации ионов He⁺ в 10 раз, причём её минимум регистрируется несколько позднее максимума концентрации О⁺. Сложнее выглядит поведение концентрации ионов водорода Н⁺: во время максимума для ионов O⁺ регистрируется небольшой минимум для ионов H⁺, который сменяется максимумом сразу за северным краем дакта, что указывает на сильные вариации концентрации ионов Н⁺ внутри возмущённой 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 концентрации и температуры электронов плазмы с масштабами порядка 20 км поперёк линий геомагнитного поля. Ниже в разделе 2.2 мы вернёмся к анализу тонкой структуры дактов. Согласно работе [20], в этом сеансе при пересечении спутником дакта регистрировался вынос ионов плазмы вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля со скоростью около 50 м/с при резком изменении поперечных (по отношению к геомагнитному полю) компонент скорости, как это видно из рис. 1e, где наблюдается резкое увеличение скорости V_z .

На рис. 5 приведены спектрограммы вариаций одной из компонент электрического поля в диапазоне частот 15 Гц÷20 кГц (a), магнитного поля в диапазоне до 1 кГц (b), а также зави-

В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Е. А. Шорохова и др.

-5

-10

-15-20

-25-30

-35

-50

-55

-60

-65

-70

-75

a)

6)

в)



Рис. 4. Изменение концентрации ионов кислорода $N_{\rm O^+}$ (a), ионов гелия $N_{\rm He^+}$ (б) и водорода $N_{\rm H^+}$ (e). Сеанс 15, 12.05.2008

Рис. 5. Спектрограммы вариаций интенсивности электрического поля I_E в диапазоне частот 15 Гц \div 20 кГц (a) и магнитного поля I_H в диапазоне до 1 кГц (б), зависимость от времени количества регистрируемых энергичных электронов с энергией $\varepsilon \approx 100$ кэВ ((в), время пересечения дакта отмечено затемнённой полосой). Сеанс 15, 12.05.2008

симость от времени количества регистрируемых энергичных электронов с энергией $\varepsilon \approx 100$ кэВ (в). Время пересечения дакта отмечено здесь затемнённой полосой. Хорошо видно, что в дакте имеет место увеличение флуктуаций электрического поля в диапазоне частот до 20 кГц и выше

В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Е. А. Шорохова и др.

с особенно сильным их усилением в диапазоне до 400 Гц; увеличение интенсивности флуктуаций напряжённости магнитного поля в диапазоне частот до 150 Гц; уширение спектра СДВ станции на частоте 19,8 кГц; возрастание в 2 раза интенсивности потока энергичных электронов по сравнению с уже увеличенным фоновым уровнем. Генерация в дакте электромагнитных излучений на таких низких частотах, а также увеличение в нём потока высыпающихся из радиационных поясов энергичных электронов дало основания авторам работы [20] прийти к следующему заключению: в этом сеансе имеет место управляемое возбуждение магнитосферного мазера путём формирования мощным радиоизлучением наземного передатчика искусственного волноводного канала (дакта концентрации плазмы). Вопрос, является ли увеличенный уровень потока энергичных электронов с 18:15 до 18:18 UT результатом работы стенда «Сура», остаётся открытым и требует отдельного рассмотрения. Очевидно, что возможность контролируемого возбуждения магнитосферного мазера при модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением открывает перспективы локального активного воздействия на ионосферно-магнитосферные связи.

Следует отметить, что 12 мая 2008 года 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 $W_{\rm p} = 5,4$ [27]. В качестве одной из причин подобного явления рассматривается наличие усиленного потока плазмы из плазмосферы в F_2 -область вдоль силовых линий геомагнитного поля. Поэтому, хотя уровень геомагнитной активности не только в этот, но и в предыдущие три дня был низким, состояние естественной ионосферы нельзя считать невозмущённым. По-видимому, магнитосфера и ионосфера были «подготовлены» к высыпанию энергичных частиц, и внешнее воздействие (модификация ионосферы мощными радиоволнами и образование дакта концентрации плазмы) могло стимулировать этот процесс. Аналогичный эффект высыпания наблюдался нами и 28 мая 2008 года (сеанс 16). Также высыпание энергичных электронов с энергией $\varepsilon \approx 40$ кэВ, плотность потока которых увеличивалась на порядок во время модификации ионосферы, было зарегистрировано в экспериментах на нагревном стенде НААRР (Аляска, США) как над самим стендом, так и в магнитосопряжённой к нему области ионосферы, причём с увеличением геомагнитной активности поток высыпающихся электронов увеличивался [28].

1.2.3. Сеанс 18 апреля 2010 года

В этом сеансе мощная радиоволна излучалась с 17:25 до 17:55 UT на частоте $f_{\rm BH} = 4\,300$ кГц ($f_{0F_2} \approx 4.7$ МГц) с мощностью $P_{\rm spdp} = 40$ МВт с наклоном диаграммы направленности 12° на юг; высота отражения составляла 260 км. Следовательно, модификация ионосферы осуществлялась в условиях, когда частота волны накачки была на 0,4 МГц ниже f_{0F_2} . Измерения выполнялись в очень спокойных геомагнитных условиях: $\Sigma K_{\rm p} = 5^-$. Минимальное расстояние между орбитой спутника и центром возмущённой магнитной силовой трубки составляло 25 км для $T^* = =17:54:03$ UT.

Результаты измерений параметров плазмы для этого сеанса представлены на рис. 6. Из измерений концентраций $N_{\rm e}$ и $N_{\rm O^+}$ видно формирование дакта с увеличенной концентрацией плазмы: на 19% по результатам измерений $N_{\rm e}$ и на 35% по результатам измерений $N_{\rm O^+}$ с максимумом концентрации в 17:54:01 UT. Размер дакта вдоль орбиты спутника составляет примерно 130 км. Отметим, что повышение концентрации $N_{\rm O^+}$ в этом сеансе сопровождалось уменьшением более чем в 2 раза концентрации наиболее лёгких ионов H⁺ (см. рис. 6*д*) и приблизительно в 2 раза ионов He⁺.

Особенностью этого сеанса является то, что, помимо первого максимума с 17:54:09 до



Рис. 6. Изменение концентрации электронов $N_{\rm e}$ (*a*), ионов кислорода $N_{\rm O^+}$ (*b*) и водорода $N_{\rm H^+}$ (*d*), а также измерения температуры электронов $T_{\rm e}$ (*b*), температуры ионов $T_{\rm i}$ (*c*) и компоненты скорости V_z (*e*). Сеанс 19, 18.04.2010

17:54:08 UT, регистрировался повторный более слабый максимум с $\delta N_{\rm O^+} \approx +14\%$ в 17:54:15 UT (или на 85 км к северу от центра возмущённой магнитной силовой трубки). Между этими двумя максимумами находилась область с минимумом концентрации плазмы в 17:54:09 UT. Вместе с первым максимумом в $N_{\rm O^+}$ регистрировалось увеличение величины $T_{\rm i}$ примерно на 10%. В этом сеансе также наблюдалось появление вариаций компоненты вектора скорости ионов в поперечном к скорости спутника направлении с 17:53:49 до 17:54:23 UT (здесь не показано), т. е. на расстоянии около 240 км вдоль его орбиты, что приблизительно в 3 раза превышает размеры основного дакта. В 17:54:06 UT возможно имело место вызванное нагревом резкое кратковременное увеличение скорости V_z , совпадающее по времени с повторным максимумом концентрации $N_{\rm O^+}$. Более сложные вариации регистрировались для концентрации и температуры электронов. По данным ленгиюровского зонда в этом сеансе, одновременно с ростом величины $N_{\rm e}$ на 20%, наблюдалось увеличение $T_{\rm e}$ на 10%. Севернее центра основного дакта видны сильные вариации концентрации электронов (от -25% до +40%) и их температуры (от -15% до +25%), которые по времени можно соотнести с повторными концентрации $N_{\rm O^+}$.

На рис. 7*a* приведена спектрограмма вариаций 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 спутника и несколько севернее основного дакта) имело место усиление шумов в диапазоне частот до 2÷3 кГц. В этом сеансе также регистрировалось пульсирующее уширение спектра сигнала СДВ станции на частоте 18,1 кГц, которая, судя по рис. 7*a*, включилась в 17:54:01 UT. Спектры со временем смещаются в сторону более высоких частот. Хотя в областях основного дакта и второго максимума концентрации плазмы (17:53:49 и 17:53:55 UT соответственно) сигнал СДВ передатчика ещё не регистрировался, здесь наблюдались сильные локальные уширения

В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Е. А. Шорохова и др.



Рис. 7. Спектрограмма вариаций интенсивности электрического поля I_E в диапазоне 15 Гц \div 20 кГц (*a*) и 10 кГц \div 3,175 МГц. Сеанс 19, 18.04.2010

спектра электрических полей ОНЧ излучений в диапазоне частот более чем до 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 концентрации $N_{\rm O^+}$ (17:54:04 UT, см. рис. 56). К анализу этих данных мы ещё вернёмся в разделе 2.3.

Каких-либо заметных вариаций в магнитных полях или в потоке энергичных электронов в этом сеансе обнаружено не было.

На рис. 76 представлена спектрограмма вариаций компоненты электрического поля в диапазоне 10 кГц÷3,175 МГц. Сигнал волны накачки на боковой частоте 2366 кГц регистрировался в виде уединённого 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 крае наиболее сильного дакта, заведомо вне области минимума концентрации плазмы между двумя дактами.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Свойства дактов концентрации плазмы

Выполненные эксперименты позволяют сделать следующие выводы о характеристиках и условиях формирования дактов с повышенной концентрацией плазмы.

Повышение концентрации плазмы в дактах в большинстве случаев составляет $\langle \delta N \rangle \approx 15 \div 25 \%$ по измерениям концентрации $N_{\rm e}$ и 20÷40 % по измерениям концентрации $N_{\rm O^+}$ с максимальным значением $\delta N_{\rm O^+}$ равным 73 % и 77 % в сеансах 15 и 18 соответственно. Размер *L* дактов вдоль траектории спутника (приблизительно поперёк геомагнитного поля в северо-южном направлении) изменялся в пределах 60÷130 км (средние значения $\langle L \rangle \approx 80\div100$ км). Во всех случаях, когда имело место формирование дактов, на ионограммах вертикального зондирования наблюдалось развитие интенсивного *F*_{spread}, подавление О-моды и часто появление Z-моды, что свидетельствует о высокой эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой и генерации вблизи уровня её отражения интенсивных искусственных ионосферных неоднородностей.

Отличительной чертой регистрируемых дактов является наличие в них высокого уровня

В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Е. А. Шорохова и др.

флуктуаций электрических 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 ±(200÷500) Гц. Имеются веские основания полагать, что подобного рода явления связаны с каналированием ОНЧ сигнала в дакте концентрации, образовавшемся при нагреве ионосферы мощной радиоволной. Ниже эти свойства дактов будут рассмотрены подробнее.

Наиболее эффективное возбуждение дактов имело место, когда частота волны накачки была на $0.5\div0.7$ МГц ниже критической частоты f_{0F_2} . При частоте $f_{\rm BH}$ лишь немного меньше частоты f_{0F_2} , как показано в работе [21], наблюдается прохождение значительной доли её энергии во внешнюю ионосферу, при этом условия формирования дактов ухудшаются. При $f_{0F_2} - f_{\rm BH} > 1$ МГц эффективность возбуждения искусственной ионосферной турбулентности может уменьшаться как из-за понижения высоты отражения волны накачки, так и из-за роста в области отражения градиента концентрации плазмы.

Формирование дактов наблюдалось, когда модификация ионосферы осуществлялась на частотах $f_{\rm BH} \leq 5 \, {\rm M}$ Гц с достаточно высокой эффективной мощностью излучения волны накачки $P_{\rm bpp} \geq 40 \, {\rm MBr}$. Высота отражения волны накачки при этом находилась в пределах $220 \div 290 \, {\rm km}$.

В целях усиления генерации искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта «магнитного зенита» в случае среднеширотного стенда «Сура» следует использовать пучок мощных радиоволн, наклоненный на угол 12° на юг от вертикали (для $f_{\rm BH} \approx 5 {\rm M}\Gamma$ ц), что обеспечивает более высокую эффективность взаимодействия мощной радиоволны с О-поляризацией с ионосферной плазмой [7, 8, 25].

Прослеживается тенденция увеличения прироста концентрации плазмы в дакте по отношению к фоновому её значению с уменьшением последнего. По-видимому, также следует считать, что условия возбуждения дактов ухудшаются при высоких ($f_{0F_2} \ge 5,5\div 6$ МГц) критических частотах (при модификации плазмы с высокой концентрацией). Заметим, что, согласно работе [29], при $f_{0F_2} \ge 6$ МГц в среднеширотной ионосфере наблюдается резкое ухудшение генерации естественного $F_{\rm spread}$ на ионограммах вертикального зондирования ионосферы (или генерации неоднородностей концентрации плазмы километровых масштабов). Также в возмущённой мощными радиоволнами ионосфере при $f_{0F_2} \ge 6$ МГц регистрируется уменьшение интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы, уровень которого определяется эффективностью взаимодействия мощной радиоволны с О-поляризацией с ионосферной плазмой и интенсивностью мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с поперечным масштабом $l_{\perp} \le$ ≤ 50 м [30].

Установлено, что рост на $10\div80\%$ концентрации ионной компоненты плазмы в дакте определяется ионами кислорода O⁺, превалирующими на высотах порядка 700 км. Концентрация ионов гелия He⁺ уменьшается (до 30 раз), если концентрация плазмы была достаточно низкой ((3,5÷3,8) · 10⁴ см⁻³), увеличивается (до 9 раз), если концентрация была средней ((4,6÷5,2) · · 10⁴ см⁻³), и не изменяется, если концентрация плазмы была высокой ((5,5÷6,1) · 10⁴ см⁻³). Концентрация наиболее лёгких ионов водорода H⁺ в дакте всегда уменьшается (до 7 раз). Заметим, что, хотя относительная величина уменьшения концентрации ионов He⁺ и H⁺ много больше относительного увеличения концентрации ионов O⁺, величина абсолютного уменьшения концентрации ионов He⁺ и H⁺ в дакте всегда много меньше увеличения концентрации ионов O⁺.

Поскольку средний поперечный размер дактов составляет 80÷100 км, то их гарантированное обнаружение возможно только в том случае, если спутник проходит на близком (не более 40 км) расстоянии от центра возмущённой магнитной силовой трубки.

Невыполнение перечисленных выше условий для формирования и обнаружения дактов концентрации плазмы объясняет отсутствие их регистрации практически во всех остальных прове-

дённых нами сеансах модификации ионосферы по программе «Сура»—DEMETER. Особо следует отметить сеанс 9, в котором расстояние D^* было примерно 68 км. Здесь дакт концентрации из-за большого расстояния 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.

Основываясь на всех выполненных измерениях, можно заключить, что при выполнении перечисленных выше условий формирование дактов концентрации плазмы при модификации F_2 области ночной ионосферы мощными короткими радиоволнами с О-поляризацией происходит с высокой вероятностью. Это позволяет использовать такие искусственные дакты в различных экспериментах по модификации состояния верхней ионосферы и магнитосферы Земли.

Отметим сеанс 26, в котором во время пролёта спутника над стендом «Сура» регистрировался дакт концентрации плазмы, хотя ко времени пролёта спутника критическая частота f_{0F_2} уже упала до 3,7÷3,9 МГц при $f_{\rm BH} = 4\,300$ МГц. Особенностью этого сеанса является то, что модификация ионосферы началась за 1,5 ч до пролёта спутника, когда ещё выполнялось условие $f_{0F_2} > f_{\rm BH}$, и продолжалась всё время до окончания сеанса. Можно предполагать, что поддержание уже созданного дакта какое-то время происходит и в условиях, когда частота волны накачки немного выше критической частоты f_{0F_2} , но частота верхнегибридного резонанса ещё остаётся ниже f_{0F_2} .

Отметим также сеанс 28, в котором был зарегистрирован дакт с уменьшенной концентрацией плазмы. Поскольку модификация ионосферы в этом случае осуществлялась в условиях $f_{\rm BH} > f_{0F_2}$ и, кроме того, он регистрировался спустя 5÷22 с после пролёта спутника около центра возмущённой магнитной силовой трубки, следует считать, что этот дакт имел естественное происхождение.

Измерения с помощью спутника DEMETER над стендом «Сура» были возможны только в полуденные и поздние вечерние (ночные) часы. Это недостаток был частично компенсирован измерениями, выполненными с помощью бортовой аппаратуры спутников серии DMSP, которые пролетали над стендом «Сура» в 05:00÷06:00 UT утром и в 13:00÷14:00 UT в ранние вечерние часы. Их результаты представлены в работах [18, 31]. На их основании можно сделать заключение, что формирование дактов с повышенной концентрацией плазмы наблюдалось и в этих условиях, однако величина увеличения концентрации плазмы в них не превышала нескольких процентов в утренние часы и была не выше 1% в вечернее время. Заметим, что во время измерений в вечерние часы критические частоты были достаточно высоки (более 6 МГц), что, как отмечалось выше, могло влиять на интенсивность формировавшихся дактов.

Формирование дактов с увеличенной концентрацией плазмы наблюдалось и в экспериментах, выполнявшихся на стенде HAARP [32–34], в которых были получены аналогичные нашим величины увеличения концентрации плазмы. Также было показано следующее: формирование дактов — обычно наблюдаемое явление; наиболее интенсивные дакты с δN до 40% формируются в условиях ночной ионосферы, когда мощная радиоволна излучается в магнитный зенит, в то время как в дневных условиях приращение концентрации плазмы в дакте не превышает 10%; в структуре дактов обнаруживаются неоднородности концентрации плазмы с размерами поперёк геомагнитного поля до 10÷20 км. Кроме того, было установлено, что из области интенсивного разогрева плазмы вблизи высоты отражения волны накачки наблюдается вынос ионов во внешнюю ионосферу, что и определяет формирование дактов.



Рис. 8. Изменение плотности электронов N_e (a) и их температуры T_e (б) в дакте. Сеанс 15, 12.04.2008

2.2. Тонкая структура дактов концентрации плазмы. Вариации температуры электронов и ионов в дакте

Ещё в работе [17] было показано, что дакты могут иметь мелкомасштабную структуру, т. е. включать в себя неоднородности концентрации плазмы с размерами поперёк геомагнитного поля около 30 км. На рис. 8 с достаточно высоким временны́м разрешением представлены результаты измерений концентрации электронов $N_{\rm e}$ и их температуры $T_{\rm e}$ в выполненном 12 мая 2008 года эксперименте, условия проведения и результаты которого рассматривались выше. Измерения $N_{\rm e}$ и $T_{\rm e}$ выполнялись каждую секунду с помощью ленгмюровского зонда. На интервале времени 18:16:21÷18:16:36 UT регистрировалось увеличение в среднем концентрации электронов (формирование дакта) приблизительно на 37% и сильные вариации её значений с периодом 2,5 с или с пространственным масштабом 19 км вдоль орбиты спутника (приблизительно в северо-южном направлении). В этом сеансе наблюдался также рост средней температуры $T_{\rm e}$ приблизительно на 15% и сильные вариации её уровня. Отметим высокую степень корреляции вариаций $N_{\rm e}$ и $T_{\rm e}$: видно, что положения их максимумов и минимумов практически полностью совпадают. Следует, однако, заметить, что такая сильная корреляция наблюдается хотя и часто, но далеко не всегда.

Анализ всех имеющихся экспериментальных данных по пролётам спутника DEMETER над работающим стендом «Сура» позволяет заключить, что вариации концентрации и температуры плазмы с характерными периодами 2÷3 с (15÷23 км) регистрировались только в области плазменного дакта. В большинстве случаев эти вариации хорошо повторяют друг друга даже в деталях, однако величина относительных вариаций температуры плазмы всегда меньше относительной величины вариаций концентрации. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что формируемый во внешней ионосфере плазменный дакт может содержать внутри себя до 10÷15 неоднородностей концентрации плазмы с размерами поперёк геомагнитного поля около 20 км. Необходимо отметить, что, согласно результатам численного и лабораторного моделирования распространения волн свистового диапазона в плазме с мелкомасштабными (по сравнению с длиной волны) неоднородностями [35], такие неоднородности могут обеспечивать необычные режимы 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 $T_{\rm e}$ (от 6 до 23%). Более сложным было поведение температуры ионов. Здесь в 5 случаях из 10 наблюдалось уменьшение температуры $T_{\rm i}$ (до 10%), в двух она оставалась без

В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Е. А. Шорохова и др.

214

изменения, а в трёх возрастала (до 16%). При этом увеличение температуры T_i наблюдалось, когда волна накачки отражалась на больши́х высотах $h \ge 250$ км, при $h \approx 240$ км наблюдалось лишь небольшое уменьшение величины T_i (на $3\div 5\%$), при ещё более низких высотах отражения мощной радиоволны $h \approx 220\div 230$ км величина уменьшения T_i возрастала, достигая 10%. В чём причина такой зависимости T_i от высоты отражения волны накачки, остаётся пока неясным.

2.3. Структура электрических полей НЧ и ОНЧ диапазонов в дакте

При рассмотрении полученных с помощью бортовой аппаратуры спутника DEMETER экспериментальных данных было продемонстрировано, что при модификации F_2 -области ионосферы мощными радиоволнами с О-поляризацией во внешней ионосфере регистрируется появление электромагнитных полей в диапазоне частот до 20 кГц и более. Ниже, следуя работе [19], мы на примере измерений 1 мая 2006 года подробно рассмотрим результаты исследований их характеристик.

Для сеанса 01.05.2006 представленные на рис. 2 результаты измерений показывают 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. 9 приведены зависимости от времени (и, следовательно, расстояния от спутника до центра возмущённой магнитной силовой трубки) электронной концентрации N_e и интенсивности электрических полей в диапазоне до 1 кГц (крайне низкочастотный (КНЧ) диапазон) и в диапазоне до 17,1÷19,1 кГц, включающем СДВ сигнал на частоте 18,1 кГц (ОНЧ диапазон). Хорошо видно, что пространственная структура изменения спектра электрического поля СДВ сигнала полностью повторяет пространственную 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 спутника, где регистрировались эти поля, составляет около 200 км, что значительно больше размера области с повышенной электронной концентрацией (70 км).

Особый интерес представляют характеристики СДВ сигнала на частоте 18,1 кГц. Видно, что вблизи возмущённой магнитной силовой трубки, кроме роста интенсивности, сильно возрастает и ширина его спектра, которая в максимуме достигает величины ±500 Гц. Это соответствует ширине спектра регистрируемого КНЧ сигнала.

В работе [19] делается вывод, что имеющая место высокая пространственная корреляция области повышенной интенсивности ОНЧ поля с областью повышенной интенсивности квазистатического электрического КНЧ поля связана с наличием в дакте мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации плазмы. Эти неоднородности, исходя из ширины спектра сигнала СДВ станции $\Delta \omega \approx (\mathbf{k}_{\text{неодн}} \mathbf{V}_{\text{ИСЗ}})$, при скорости спутника $V_{\text{ИСЗ}}$ 7,6 км/с имеют размеры $l_{\perp} \approx 10 \div 10^3$ м. Именно 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 о влиянии таких неоднородностей на распространение радиоволн свистового диапазона пришли на основе лабораторного и численного моделирования авторы работы [35].

Уширение спектра сигнала СДВ передатчиков до 1 кГц с одновременным появлением электростатических КНЧ шумов давно наблюдается в естественных условиях преимущественно в авроральных широтах, где имеет место повышенный уровень ионосферной турбулентности. Анализ этого эффекта проведён в работах [36, 37], 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 $l_{\perp} \leq 1 \div 2$ км, которые появляются в ионосфере за счёт развития различного типа неустойчивостей. Видно, что по своим характеристикам эффекты, связанные с уширением



Рис. 9. Зависимости от времени электронной концентрации N_e (кривая 1), интенсивности электрических полей в диапазоне до 1 кГц (кривая 2) и интенсивности электрических полей I_E в диапазоне до 17,1÷19,1 кГц, включающем СДВ сигнал на частоте 18,1 кГц (кривая 3). Сеанс 6, 01.04.2006

спектра сигналов СДВ передатчиков в естественной и модифицированной мощной радиоволной ионосфере, во многом совпадают.

На рис. 7*a* 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 имеет пульсирующий характер, причём максимумы уширения совпадают с максимумами концентрации плазмы. Последнее ещё раз доказывает, что в дактах с повышенной концентрацией плазмы сосредоточены неоднородности с $l_{\perp} \leq 10^3$ м.

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, полученным в работе [13]. В указанной работе было показано, что их появление связано с рассеянием коротковолновых нижнегибридных плазменных колебаний (возбуждаемых при развитии тепловой параметрической неустойчивости вблизи высоты отражения мощной радиоволны с О-поляризацией) на вытянутых вдоль геомагнитного поля мелкомасштабных неоднородностях концентрации плазмы в вистлеры, которые уходят во внешнюю ионосферу, где и регистрируются бортовой аппаратурой спутника.

2.4. Прохождение поля волны накачки во внешнюю ионосферу

Детальный анализ условий, при которых энергия мощной радиоволны может просачиваться во внешнюю ионосферу в случае, когда невозмущённый мощной радиоволной F₂-слой ионосферы являлся непрозрачным, был выполнен в работе [21] на основе всех данных, полученных за время

В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Е. А. Шорохова и др.

миссии спутника DEMETER. Он показал следующее:

1) регистрация электрического поля волны накачки на высотах внешней ионосферы была возможна не только при условии $f_{\rm BH} > f_{0F_2}$, но и когда частота мощной радиоволны с Ополяризацией была меньше критической частоты f_{0F_2} до начала модификации ионосферы, но не более чем на $0.5\div0.7$ МГц;

2) прошедшая в условиях $f_{\rm BH} < f_{0F_2}$ мощная радиоволна имела высокую интенсивность, которая по своей величине была порядка интенсивности радиоизлучения, зарегистрированного при излучении мощной радиоволны «на просвет»;

3) интенсивность сигнала волны накачки характеризовалась большими вариациями для близких условий измерений;

4) имело место совпадение пятна с наибольшей интенсивностью сигнала с дактом повышенной концентрации плазмы;

5) для случая, когда дакт имел двугорбую форму (сеанс 19), сигнал волны накачки обнаруживался в области более сильного максимума концентрации плазмы, а не в провале между максимумами в области его фокусировки, как это предполагалось в работе [38].

В работе [21] была предложена модель прохождения излучения на частоте волны накачки во внешнюю ионосферу при модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением за счёт совместного влияния уменьшения на $10\div20$ % концентрации плазмы вблизи высоты отражения мощной радиоволны (образование полости с дефицитом концентрации плазмы или фокусирующей линзы) [8, 26] и генерации искусственных неоднородностей концентрации плазмы километровых масштабов в возмущённой области ионосферы. В рамках этой модели удалось объяснить все отмеченные выше основные свойства полученных экспериментальных данных. Существование эффекта ослабления генерации искусственной ионосферной турбулентности на высотах отражения волны накачки в условиях, когда частота мощной радиоволны до её включения была лишь немного меньше частоты f_{0F_2} , отмечалось в работах [18, 39, 40]. Во всех случаях это связывалось с просачиванием мощной радиоволны через сильно турбулизованный F_2 -слой ионосферы.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ 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) [41]. 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 до нескольких тысяч километров. Околоземная плазма описывается гидродинамическими уравнениями для переноса ионов и электронов, дополненных условием квазинейтральности. Поведение нейтральной компоненты ионосферы описывается с помощью эмпирических моделей NRLMSIS00 и HWM93.

Для моделирования тепловых эффектов в уравнение теплопроводности для электронов в программном коде модели SAMI2 был введён дополнительный источник $Q_{\rm HF}$, связанный с нагревом электронов полем плазменных волн, эффективно возбуждаемых мощной радиоволной вблизи уровня её отражения от ионосферы [42]. Источник $Q_{\rm HF}$ представляется в виде модельного гауссова источника

$$Q_{\rm HF} = \left| \frac{\mathrm{d}T_{\rm e}}{\mathrm{d}t} \right|_{z=z_0, \theta=\theta_0} \exp\left[-\frac{(z-z_0)^2}{\Delta z^2} \right] \exp\left[-\frac{(\theta-\theta_0)^2}{\Delta \theta^2} \right],\tag{1}$$

В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Е. А. Шорохова и др.



Рис. 10. Модельные расчёты динамики формирования крупномасштабных возмущений концентрации и температуры электронов на высоте 660 км. Расчёты проводились по данным сеанса 6 (1 мая 2006 года)

где (z_0, θ_0) и $(\Delta z, \Delta \theta)$ — координаты центра и характерные размеры области нагрева соответственно. В модели ионосферная плазма считается квазинейтральной с $N_{\rm e} = N_{\rm i}$.

Представленные ниже результаты численного моделирования были выполнены для сеанса 6, проведённого 1 мая 2006 года. Они показали, что индуцируемые возмущения плазмы локализованы в достаточно узкой силовой трубке геомагнитного поля с характерным поперечным масштабом порядка 80 км. Возмущения температуры и концентрации электронов захватывают практически всю толщу ионосферы и наблюдаются как ниже области отражения волны накачки (до 170 км), так и на высотах внешней ионосферы Земли. При этом на высотах 200÷400 км наблюдается образование полости с уменьшенной концентрацией плазмы; дакт с увеличенной концентрацией плазмы обнаруживается на высотах h > 400 км.

На рис. 10 представлена динамика формирования искусственных возмущений плазмы на высоте орбиты спутника DEMETER $h \approx 660$ км. Широтные профили распределений концентрации и температуры электронов (поперечное сечение дактов) приведены на рис. 10*a*, *в* для моментов времени 18:18:00 UT (кривые 1), 18:20:00 UT (кривые 2), 18:28:30 UT (кривые 3) и 18:38:00 UT (кривые 4). На рис. 10*b*, *в* приведены зависимости от времени концентрации и температуры электронов на оси возмущённой магнитной силовой трубки. Здесь времена включения и выключения источника нагрева отмечены вертикальными линиями. Согласно сделанным расчётам, размер дакта здесь составляет примерно 80 км (70 км), увеличение концентрации плазмы в дакте равно примерно 25 % (21 % по измерениям N_e) при увеличении температуры электронов на 6 % (7%), где в скобках даны измеренные характеристики дакта. Видно практически полное соответствие

результатов моделирования экспериментальным данным.

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 величину порядка 30 мин, хотя интенсивность дакта значительно уменьшается уже в первые 6 мин после окончания нагрева.

Согласно выполненным измерениям, в области возмущённой магнитной силовой трубки наблюдается увеличение концентрации ионов O^+ , в то время как концентрация более лёгких ионов H^+ , наоборот, уменьшается. Как следует из проведённого моделирования, такое изменение концентраций O^+ и H^+ при модификации ионосферы связано с тем, что их высотные профили различны: максимум концентрации ионов O^+ находится на высотах порядка 300 км, и поэтому движение этих ионов вверх приводит к увеличению их концентрации на бо́льших высотах; максимум концентрации более лёгких ионов H^+ находится на высотах около 800 км, и поэтому ниже 800 км их концентрация из-за движения плазмы вверх должна уменьшаться. Однако здесь остаётся необъяснённой очень большая величина уменьшения концентрации лёгких ионов.

Выполненные расчёты показали, что во время воздействия мощного коротковолнового радиоизлучения скорость ионов O⁺ выше области отражения волны накачки направлена вверх (в южную полусферу) и составляет около 100÷150 м/с. При выключении нагрева направление скорости ионов изменяет знак. При этом можно считать, что её величина сохраняется. Зависимость от времени скорости ионов H⁺ имеет аналогичный характер. Скорость выноса ионов при модификации ионосферы мощными радиоволнами много раз измерялась экспериментально (см., например, работы [34, 43, 44]). Согласно результатам этих исследований её величина изменяется в пределах от 30 до 300 м/с, увеличиваясь с ростом высоты. Эти значения соответствуют результатам как наших расчётов, так и расчётов, выполненных в работе [34] на основе модифицированной модели SAMI2.

Таким образом, результаты представленного выше моделирования хорошо соответствуют основным результатам выполненных на стенде «Сура» экспериментов. Они также находятся в согласии с результатами аналогичного моделирования, выполненного в работе [45] для условий модификации ионосферы на стенде HAARP. Всё это позволяет считать, что имеет место достаточно полное представление о процессах, протекающих в модифицированной мощными радиоволнами ионосфере. При этом для более глубокого их понимания можно использовать возможности численного моделирования этих процессов для получения необходимой дополнительной информации, которую не всегда удаётся получить экспериментально. В первую очередь, это касается изучения динамических процессов при формировании дактов концентрации плазмы.

4. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Выполненные в 2005–2010 годах исследования по программе «Сура»—DEMETER продемонстрировали, что при воздействии мощными радиоволнами с О-поляризацией на F_2 -область ионосферы на высотах внешней ионосферы ($h \ge 400$ км) формируются дакты с повышенной концентрацией плазмы, возникают возмущения концентрации и температуры плазмы, а также регистрируются КНЧ и 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 далеко за их пределами. Анализ полученных экспериментальных данных позволил изучить характеристики дактов концентрации плазмы и определить условия их формирования. Было установлено, что при выполнении определённых условий формирование дактов при модификации ночной F_2 -области ионосферы мощными

218

короткими радиоволнами — достаточно регулярное явление. Последнее подтверждается экспериментами, выполненными на стенде HAARP [34], а также результатами радиотомографических исследований [46].

Проведённые по программе «Сура»—DEMETER эксперименты выполнялись в годы минимума солнечной активности при низком или очень низком уровне геомагнитных возмущений и низких критических частотах F_2 -области ионосферы. Поэтому удалось выполнить далеко не все возможные эксперименты, статистика полученных результатов была не слишком представительной, иногда полученные результаты вообще имели единичный характер. Ещё требуют решения вопросы, связанные с выявлением зависимости характеристик дактов от состояния ионосферы и объяснением наблюдающихся вариаций температуры электронов и ионов в зависимости от высоты отражения мощной радиоволны. Известно, что для передачи плазменных возмущений на больши́е высоты необходимо, чтобы мощная радиоволна отражалась выше $250\div300$ км [5, 10, 11]. Однако в наших экспериментах формирование дактов и плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы наблюдалось и при высоте отражения волны накачки около 220 км, что ещё требует более детального рассмотрения.

Параллельно исследования свойств дактов активно проводились и на стенде HAARP при более высоких, чем на стенде «Сура», мощностях волны накачки и при более низких частотах её излучения. В частности, много экспериментов было выполнено при $f_{\rm BH} \approx 2,8\div3~{\rm MF}$ ц, 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 искусственная ионосферная турбулентность обладает особыми специфическими свойствами, что необходимо принимать во внимание при интерпретации получаемых экспериментальных данных. Итоги выполненных на стенде HAARP исследований свойств дактов подведены в работе [34]. Также, как и в экспериментах на стенде «Сура», здесь отмечается регулярность формирования дактов, показано, что днём дакты слабее, чем ночью, что их формирование наиболее эффективно при излучении волны накачки в магнитный зенит и что внутри ночных дактов обнаруживаются крупномасштабные неоднородности концентрации плазмы. Представленные в работе [34] результаты численного моделирования на основе модели SAMI2 дают хорошее предсказание основных параметров дактов.

Хорошо известно, что эксперименты с низкоорбитальными спутниками имеют ряд принципиальных ограничений. В частности, с их помощью практически невозможно получить характеристики распространения плазменных возмущений в магнитной силовой трубке от области генерации искусственной ионосферной турбулентности вблизи высоты отражения мощной радиоволны, что имеет решающее значение для верификации предложенных моделей. В последние годы для решения этой задачи на стенде «Сура» проводятся эксперименты по зондированию возмущённой магнитной силовой трубки сигналами спутников навигационной системы GPS, показавшие определённую перспективность этого направления исследований [45]. С этой же целью в сентябре 2014 года и в феврале 2015 года впервые были выполнены эксперименты по зондированию возмущённой магнитной силовой трубки сигналами харьковского радара некогерентного рассеяния. Полученные в них данные в настоящее время обрабатываются.

В заключение отметим следующее. На территории Нижегородской области, помимо стенда «Сура», работает ещё и мощный СДВ передатчик. Такое сочетание двух мощных комплексов, расположенных на расстоянии около 130 км друг от друга, позволяет проводить эксперименты по исследованию возможностей перенаправления энергии ОНЧ радиоволн в магнитосферу. Это новое направление исследования околоземного космического пространства было предложено в работе [47] как проект «Сура»—«ГОЛИАФ». При организации исследований в рамках этого проекта стенд «Сура» должен использоваться для создания искусственного дакта плазмы, в который

будут захватываться излучаемые СДВ передатчиком ОНЧ волны и выводиться за пределы ионосферы в магнитосферу. Ясно, что комплекс «Сура»—«ГОЛИАФ» даёт уникальную возможность постановки экспериментов по управлению магнитосферным распространением ОНЧ радиоволн.

Авторы выражают благодарность сотрудникам стенда «Сура» за оказанную ими помощь в проведении экспериментальных исследований. Исследования В. Л. Фролова и Е. А. Шороховой выполнялись при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект 14–12–00556) в части сбора и анализа полученных экспериментальных данных. Исследования А. С. Белова были поддержаны Правительством Российской Федерации (договор 11.G34.31.0048). Представленные в обзоре результаты экспериментов, выполненных на стенде «Сура» по программам «Сура»—DEMETER и «Сура»—DMSP (2005–2012 годы), были получены при финансовой поддержке РФФИ (проекты 05–02–16493, 08–02–00171 и 11–02–00374) и ФЦП «Геофизика».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Helliwell R. A. Whistlers and related ionospheric phenomena. Stanford: Stanford Univ. Press, 1965. 349 p.
- 2. Walker A. D. M. // Planet. Space Sci. 1978. V. 26, No. 4. P. 375.
- 3. Smith R. S., Helliwell R. A., Yabroff I. W. // J. Geophys. Res. 1960. V. 65, No. 3. P. 815.
- 4. Карпман В. И., Кауфман Р. Н. // Геомагн. аэрономия. 1983. Т. 23, № 3. С. 451.
- 5. Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. New York: Springer, 1978. 370 p.
- Брухимов Л. М., Метелёв С. А., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
- 7. Гуревич А.В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1 145.
- 8. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // УФН. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
- 9. Борисов Н. Д., Золотарёв И. П. // Геомагн. аэрономия. 1983. Т. 23, № 5. С. 797.
- 10. Васьков В. В., Димант Я. С., Рябова Н. А. и др. // Геомагн. аэрономия. 1992. Т. 32, № 5. С. 140.
- 11. Васьков В. В., Комраков Г. П., Рябова Н. А. // Геомагн. аэрономия. 1995. Т. 35, № 5. С. 75.
- 12. Васьков В. В., Беляев П. П., Будько Н. И. и др. // Геомагн. аэрономия. 1993. Т. 33, № 6. С. 91.
- Vaskov V. V., Budko N. I., Kapustina O. V., et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 1998. V. 60, No. 12. P. 1 261.
- 14. Гдалевич Г. Л., Клос З., Михайлов Ю. М. // Геомагн. аэроном. 2003. Т. 43, № 5. С. 645.
- 15. Костин В. М., Романовский Ю. А., Чмырёв В. М. и др. // Космические исследования. 1993. Т. 31, вып. 1. С. 84.
- Васьков В. В., Комраков Г. П., Ораевский В. Н. и др. // Геомагн. аэроном. 1995. Т. 35, № 1. С. 154.
- Рапопорт В. О., Фролов В. Л., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 709.
- Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 915.
- Rapoport V. O., Frolov V. L., Polyakov S. V., et al. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, No. A10. Art. no. A10322.
- 20. Марков Г.А., Белов А.С., Фролов В.Л. и др. // Журн. экспер. теор. физ. 2010. Т. 138, вып. 6(12). С. 1037.
- Фролов В. Л., Митяков Н. А., Шорохова Е. А., Парро М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 6. С. 361.

В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Е. А. Шорохова и др.

- 22. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Шорохова Е. А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101, вып. 5. С. 342.
- 23. Planetary and Space Science. 2006. V. 54, $\mathbb{N}^{\underline{o}}$ 5.
- 24. Караштин А. Н., Комраков Г. П., Токарев Ю. В., Шлюгаев Ю. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 8. С. 765.
- 25. Фролов В. Л. // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, вып. 2. С. 22.
- 26. Гетманцев Г. Г., Зуйков Н. А., Котик Д. С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20, вып. 4. С. 229.
- 27. Gulyaeva T. L., Stanislawska L. // Ann. Geophysicae. 2008. V. 26, No. 9. P. 2645.
- 28. Давыдов В. Е., Зинкина М. Д., Писанко Ю. В. // Гелиогеофиз. исследования. 2015. Вып. 12. С. 11.
- 29. Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокуров В.Д., Чернобровкина Н.А. Явление Fрассеяния в ионосфере. М.: Наука, 1984. 144 с.
- Frolov V. L., Sergeev E. N., Ermakova E. N., et al. // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28, No. 16. P. 3 103.
- Фролов В. Л., Болотин И. А., Рапопорт В. О. и др. // Сб. докл. XXIV Всеросс. научной конф. «Распространение радиоволн», 29 июня–5 июля 2014 года, г. Иркутск. Т. 3. С. 116.
- Milikh G. M., Papadopoulos K., Shroff H., et al. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35, No. 17. Art. no. L17104.
- 33. Fallen C. T., Secan J. A., Watkins B. J. // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38, No. 8. Art. no. L08101.
- 34. Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E., et al. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, No. A10. Art. no. A10307.
- 35. Айдакина Н. А., Гущин М. Е., Зудин И. Ю. и др. // Сб. докл. XXIV Всеросс. научной конф. «Распространение радиоволн», 29 июня–5 июля 2014 года, г. Иркутск. Т. 3. С. 25.
- 36. Титова Е. Е., Ди В. И., Иржичек Ф. и др. // Геомагн. аэрономия. 1984. Т. 24, № 6. С. 935.
- 37. Трахтенгерц В. Ю., Титова Е. Е. // Геомагн. аэрономия. 1985. Т. 25, № 1. С. 89.
- Vartanyan A., Papadopoulos K., Parrot M. // J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. 2011. V. 73, No. 13. P. 1674.
- 39. Fialer P. A. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 923.
- 40. Haslett J. C., Megill L. R. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 1005.
- 41. Huba J. D., Joyce G., Fedder J. A. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, No. A10. P. 23,035.
- 42. Белов А.С. // Журн. экспер. теор. физ. 2015. Т. 148, вып. 4(10). С. 758.
- Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. No. A4. P. 1 141.
- 44. Milikh G. M., Mishin E., Galkin I., et al. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. Art. no. L18102.
- 45. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Глухов Я. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 2. С. 91.
- 46. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L., et al. // Radio Sci. 2012. V. 47. Art. no. RS0L15.
- 47. Polyakov S. V., Kononov Yu. M., Shchors Yu. G., et al. // Abstracts VII Int. Suzdal URSI Symposium "Modification of the ionosphere by powerful radio waves". Moscow, October 16–18, 2007. P. 54.

Поступила в редакцию 8 июня 2015 г.; принята в печать 23 ноября 2015 г.

FEATURES OF ELECTROMAGNETIC AND PLASMA PERTURBATIONS INDUCED IN THE EARTH'S OUTER IONOSPHERE BY MODIFICATION OF THE F_2 IONOSPHERIC REGION USING HIGH-POWER HF RADIO WAVES RADIATED BY THE SURA HEATING FACILITY

V. L. Frolov, V. O. Rapoport, E. A. Schorokhova, A. S. Belov, M. Parrot, and J.-L. Rauch

In this paper we systematized experimental results of the DEMETER satellite studies of the duct features formed at altitudes of about 700 km due to modification of the F_2 ionospheric region by high-power HF radio waves radiated by the Sura heating facility. The experiments were carried out in 2005–2010. Based on all the measurements, we determined conditions for the formation of such ducts, studied their characteristics, and demonstrated some opportunities for their influence on the ionosphere–magnetosphere coupling, as well as on propagation of radio waves of different frequency ranges. The results of numerical simulation of the duct formation are presented.