

УДК 533.951+537.868

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ МОЩНОЙ КОРОТКОЙ РАДИОВОЛНЫ ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

*В. Л. Фролов*¹, *Н. А. Митяков*¹, *Е. А. Шорохова*¹, *М. Парро*²

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

² Environment Physics and Chemistry Laboratory, France

С помощью бортовой аппаратуры микроспутника DEMETER на высотах порядка 670 км выполнены измерения напряжённости электрического поля мощной радиоволны, излучаемой нагревным стендом «Сура». Анализ полученных данных показал, что наблюдается прохождение мощной радиоволны во внешнюю ионосферу в условиях, когда в невозмущённой ионосфере разность между критической частотой и частотой волны накачки не превышает 0,5–0,7 МГц. Определены энергетические и пространственные характеристики прошедшей через ионосферу мощной радиоволны. Обсуждается возможный механизм, объясняющий её прохождение в закритическую плазму.

ВВЕДЕНИЕ

Известно (см., например, специальные выпуски журналов [1–9], обзоры [10–14] и цитируемую в них многочисленную литературу), что мощные короткие радиоволны с обыкновенной (О) поляризацией, излучаемые нагревными стендами в вертикальном или в близком к вертикальному направлении, возбуждают в F_2 -области ионосферы вблизи высоты их отражения интенсивную искусственную ионосферную турбулентность. Эта турбулентность влияет на распространение радиоволн различных диапазонов и, в частности, на характер распространения, собственно, волны накачки [15–17]. Здесь возможна ситуация, когда во время модификации ионосферы формируется полость с дефицитом концентрации плазмы и локальное значение критической частоты F_2 -слоя ионосферы f_{0F_2} уменьшается. Тогда волна накачки на частоте $f_{ВН}$ лишь немного меньшей, чем f_{0F_2} , начинает проходить через ионосферу, что приводит к изменению условий её взаимодействия с плазмой [18]. Возможно также проникновение поля волны накачки вверх через окно прозрачности с трансформацией падающей волны с обыкновенной поляризацией в быструю волну с необыкновенной поляризацией (Z -моду) [19–21] или за счёт рассеяния О-волны в Z -моду на мелкомасштабных неоднородностях концентрации плазмы [12, 22]. Изучать особенности проникновения радиоволны в закритическую плазму с поверхности Земли достаточно сложно. Для этих целей лучше подходят измерения полей с помощью бортовой аппаратуры, установленной на геофизических ракетах и орбитальных спутниках (см., например, [23, 24]).

Спутниковые измерения напряжённости электрического поля мощной радиоволны, излучаемой стендом «Сура», были выполнены в 2005–2010 годах с помощью размещённого на спутнике DEMETER оборудования, детальное описание которого представлено в [25]. Спутник имел полярную круговую орбиту, когда в одно и то же время (около 7:30 и 18:00 UT) он мог в некоторые дни находиться на достаточно близком к стенду «Сура» расстоянии. Орбита спутника проходила на расстоянии не больше 50 км от центра возмущённой магнитной силовой трубки не чаще, чем 2–3 раза в месяц. Анализ полученных во время этих измерений данных, касающихся распределения интенсивности сигнала на частоте волны накачки на высотах около 670 км, составляет содержание данной работы. Предварительные результаты обработки этих данных были представлены в [26]. В работе [27] представлены результаты аналогичных измерений, выполненных на нагревном стенде HAARP (Аляска, США). В работе [27], в частности, делается вывод о том,

что фокусировка электромагнитной волны в дакте с пониженной концентрацией плазмы приводит к значительному увеличению напряжённости электрического поля сигнала волны накачки во внешней ионосфере. Как будет показано ниже, этот вывод не подтверждается результатами наших измерений.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Характеристики нагревного стенда «Сура» и бортовой аппаратуры спутника DEMETER

Нагревный стенд «Сура» (НИРФИ, г. Нижний Новгород, Россия), расположен в 120 км к востоку от г. Нижний Новгород; его координаты $56,15^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д. [14]. Стенд имеет трёхмодульную структуру. Каждый модуль состоит из коротковолнового передатчика, генерирующего высокочастотное излучение с мощностью до 250 кВт, который нагружен на свою антенную решётку. Решётка состоит из 12×4 широкополосных скрещённых диполей и вытянута по линии восток—запад. Стенд может излучать волны с обыкновенной (O) или необыкновенной (X) поляризациями 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 решётка состоит из 144 диполей, занимающих площадь $300 \times 300 \text{ м}^2$. Эффективная мощность излучения стенда при этом составляет порядка 80 МВт на частоте $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц, увеличиваясь до 280 МВт на частоте $f_{\text{ВН}} = 9300$ кГц. Луч антенны стенда в плоскости магнитного меридиана может отклоняться от вертикали в пределах 45° в обе стороны.

Эксперименты со спутником DEMETER проводились на нескольких фиксированных частотах волны накачки в диапазоне $4,3 \div 5,8$ МГц с использованием двух соседних или всех трёх модулей стенда. Эффективная мощность волны накачки составляла 40 или 80 МВт ($f_{\text{ВН}} = 4,3$ МГц) и 70 или 150 МВт ($f_{\text{ВН}} = 5,8$ МГц) при работе двух или трёх модулей стенда соответственно. При условии распространения мощной радиоволны в свободном пространстве расчётная напряжённость электрического поля на высоте 670 км составляет $80 \div 170$ мВ/м. Диаграмма направленности антенны была в большинстве случаев наклонена в плоскости геомагнитного меридиана на 12° к югу от вертикали, чтобы обеспечить усиление генерации искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта магнитного зенита [12, 28]; в нескольких случаях использовался вертикально направленный пучок мощных радиоволн.

Согласно [29], высокочастотный канал бортового измерителя электрических полей ICE (Instrument champ électrique) регистрирует одну компоненту поля в диапазоне частот $10 \div 3175$ кГц (чаще всего горизонтальную компоненту, ортогональную вектору скорости спутника) с частотой оцифровки принимаемого сигнала 6666 кГц. Полоса приёма и динамический диапазон этого канала составляют 3,25 кГц и 42 дБ соответственно; уровень шумов приёмника при такой полосе составляет порядка 3 мкВ/м. Усиление приёмника на частотах выше 3175 кГц резко уменьшается, что приводит к уменьшению регистрируемой напряжённости электрического поля волны накачки. Также использование частоты оцифровки 6666 кГц не позволяет проводить спектральный анализ сигналов на частотах, превышающих 3,3 МГц. Поэтому характеристики сигнала волны накачки для используемых на стенде «Сура» частот $f_{\text{ВН}} \geq 4,3$ МГц не могли быть прямо измерены данным прибором. Однако в спектре принимаемого сигнала после его оцифровки и спектрального разложения с использованием метода быстрого преобразования Фурье он обнаруживается на боковой частоте, равной разности частоты дискретизации и частоты сигнала.

Например, при $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц в спектре регистрируемого излучения появляется сигнал на частоте 2366 кГц, равной разности частоты накачки и частоты дискретизации; эта частота уже

попадает в полосу анализа прибора ICE. Измеренная напряжённость электрического поля для таких сигналов для $f_{\text{ВН}} = 4\,300$ кГц не превышала 250 мкВ/м. С ростом частоты волны накачки от 4,3 до 5,8 МГц амплитуда принимаемого излучения уменьшалась на 10÷15 дБ, несмотря на увеличивающуюся при этом эффективную мощность излучения мощной радиоволны, что связано с увеличивающимся ослаблением сигнала в фильтрах прибора ICE. Величина 250 мкВ/м на 38 дБ превышает уровень шумов приёмной аппаратуры при её динамическом диапазоне 42 дБ. Следовательно, в нашем случае амплитуда регистрируемого сигнала на боковой частоте не достигала уровня насыщения измерителя полей, и можно считать, что вариации её величины пропорциональны полю волны накачки. Разумеется, истинное значение напряжённости поля волны накачки на высотах орбиты спутника при этом не могло быть определено.

1.2. Общая характеристика полученных результатов

Из всего объёма выполненных экспериментов по программе «Сура»—DEMETER для анализа структуры электрического поля волны накачки во внешней ионосфере было отобрано 28 сеансов измерений, которые сведены в табл. 1. Все они были выполнены в поздние вечерние часы (около 18:00 UT), когда практически отсутствует регулярное поглощение радиоволн в нижней ионосфере (в *D*- и *E*-слоях) и не образуется дефокусирующая линза на высотах 130÷170 км [30]. При этом во внешней ионосфере часто регистрировалось появление дактов с повышенной концентрацией плазмы, индуцированных нагревом F_2 -области мощными радиоволнами [31]. Для этих сеансов орбита спутника на широте стенда «Сура» проходила приблизительно с юга на север. Нагрев ионосферы осуществлялся, как правило, в течение 15÷20 мин, начиная за 13÷18 мин до пролёта спутника над стендом, что, согласно [13, 31], является достаточным временным интервалом для развития искусственной ионосферной турбулентности не только в области отражения волны накачки, но и на высотах внешней ионосферы. Из-за наличия большого поглощения радиоволн в нижней ионосфере и влияния образующейся на высотах 130÷170 км дефокусирующей линзы измерения в полуденные часы проводились редко, и значимых результатов в них получено не было.

В большинстве приведённых в табл. 1 сеансов измерений частота волны накачки была ниже частоты f_{0F_2} , что объясняется нацеленностью выполняемых экспериментов на возбуждение интенсивной искусственной ионосферной турбулентности в области отражения мощной радиоволны с *O*-поляризацией. Однако в нашем распоряжении имеются 3 сеанса (сеансы 4, 26, 28 в табл. 1), когда частота волны накачки заведомо превышала критическую частоту f_{0F_2} , что позволяет получить определённые сведения о характеристиках прошедшей через ионосферу мощной радиоволны в режиме её излучения «на просвет». Интерес могут представлять также сеансы 5, 11, 12 и 14, когда частота волны накачки с *O*-поляризацией была порядка f_{0F_2} ; при этом часть её мощности поглощалась при взаимодействии мощной радиоволны с плазмой, в то время как другая её часть по разным причинам могла проходить во внешнюю ионосферу.

В табл. 1 представлены характеристики всех используемых для анализа сеансов измерений с краткими комментариями к полученным результатам. В первом столбце приведён порядковый номер сеанса. В сеансах 4, 26, 28 (а возможно, и в сеансах 5, 11, 12 и 14) осуществлялся нагрев «на просвет»; в сеансах 1, 15, 16, 18, 19 и 23 осуществлялся нагрев в условиях $0 < f_{0F_2} - f_{\text{ВН}} \leq 0,7$ МГц, и в них регистрировались сигналы волны накачки и дакты концентрации; в сеансах 2, 9, 10, 13, 17 и 27 также осуществлялся нагрев в условиях $0 < f_{0F_2} - f_{\text{ВН}} \leq 0,7$ МГц и имела место регистрация сигналов волны накачки, но дакты концентрации в них не обнаруживались; наконец, в сеансах 3, 7, 20, 22, 24 и 25 сигналы волны накачки и дакты концентрации не регистрировались аппаратурой спутника. В сеансах 6 и 8 наблюдалось формирование дактов концентрации, но электрические по-

Таблица 1

№	Дата; время T^* (УТ); расстояние D^* , км	Время нагрева (УТ), частота, мощность и направление излучения волны накачки	f_{0F_2} , МГц; $h_{отр}$, км; ΣK_p	Изменение концентрации в максимуме дакта δN и время регистрации дакта (УТ)	Характеристики электрического поля на частоте регистрации сигнала волны нагрева
1	30.04.2005 18:25:36 26	18:15÷18:30 4 600 кГц 100 МВт 12° к югу	5,2 287 30 ⁻	$\delta N = 40\%$ 18:25:32÷18:25:43	Излучение на 2 066 кГц, $J = -0,7$; $T = 18:25:31÷18:26:10$; $T_{max} = 18:25:36$
2	25.05.2005 18:19:54 67	18:09÷18:34 5 828 кГц 150 МВт вертикально	6,6 246 7	Не обнаруживается	Излучение на 838 кГц, $J = -1,65$; $T = 18:19:26÷18:19:49$; $T_{max} = 18:19:45$
3	13.08.2005 18:20:43 40	18:10÷18:25 4 300 кГц 40 МВт вертикально	4,4 268 23	Не обнаруживается	Поле волны накачки не обнаруживается
4	05.09.2005 18:26:41 73	18:16÷18:31 4 300 кГц 80 МВт вертикально	3,6 — 20 ⁺	Не обнаруживается	Излучение на 2 366 кГц, $J = 1,2$; $T = 18:25:46÷18:28:32$; $T_{max} = 18:26:18$
5	18.04.2006 18:22:59 5	18:12÷18:27 4 300 кГц 80 МВт вертикально	4,4 → 3,9 240 12	Не обнаруживается	Излучение на 2 366 кГц, $J = 0,1$; $T = 18:22:17÷18:24:14$; $T_{max} = 18:22:31$
6	01.05.2006 18:28:39 42	18:18÷18:33 4 300 кГц 80 МВт 12° к югу	5,8 230 2 ⁺	$\delta N = 27\%$ 18:28:39÷18:28:49	Поле волны накачки не обнаруживается
7	04.05.2006 18:22:34 65	18:12÷18:27 4 300 кГц 80 МВт 12° к югу	5,3 240 20	Не обнаруживается	Поле волны накачки не обнаруживается
8	17.05.2006 18:28:34 39	18:18÷18:33 4 785 кГц 120 МВт 12° к югу	5,9 220 10	$\delta N = 34\%$ 18:28:29÷18:28:40	Поле волны накачки не обнаруживается
9	20.05.2006 18:22:31 68	18:12÷18:27 5 455 кГц 150 МВт 12° к югу	5,7 225 12 ⁻	Не обнаруживается	Излучение на 1 211 кГц, $J = -2$; $T = 18:22:25÷18:22:39$; $T_{max} = 18:22:31$
10	24.08.2006 18:22:26 55	18:12÷18:27 4 300 кГц 80 МВт 12° к югу	4,5 245 9	Не обнаруживается	Излучение на 2 366 кГц, $J = -0,5$; $T = 18:22:14÷18:22:42$; $T_{max} = 18:22:30$
11	05.04.2007 18:22:30 43	18:12÷18:27 5 480 кГц 150 МВт 12° к югу	5,5 — 7	Не обнаруживается	Излучение на 1 186 кГц, $J = -1,5$; $T = 18:21:16÷18:24:48$; $T_{max} = 18:22:04$

Таблица 1 (продолжение)

12	07.05.2007 18:22:38 34	18:16÷18:26 4 785 кГц 120 МВт 12° к югу	4,8 270 21 ⁺	Не обнаруживается	Излучение на 1 881 кГц, $J = -2,1$; — $T_{\max} = 18:22:28$
13	24.08.2007 18:29:42 125	18:19÷18:34 4 300 кГц 80 МВт 12° к югу	4,7 240 2	Не обнаруживается	Излучение на 2 366 кГц, $J = -0,7$; $T = 18:29:24÷18:29:56$; $T_{\max} = 18:29:40$
14	30.08.2007 18:17:38 64	18:13÷18:28 4 300 кГц 80 МВт 12° к югу	4,2÷4,3 260 8 ⁺	Не обнаруживается	Излучение на 2 366 кГц, $J = -0,3$; $T = 18:16:42÷18:18:34$; $T_{\max} = 18:17:41$
15	12.05.2008 18:16:28 21	18:05÷18:20 4 300 кГц 80 МВт 12° к югу	5,0 220 6 ⁻	$\delta N = 75\%$ 18:16:21÷18:16:36	Излучение на 2 366 кГц, $J = 1,2$; $T = 18:15:59÷18:16:42$; $T_{\max} = 18:16:17$
16	28.05.2008 18:16:28 40	18:00÷18:21 4 300 кГц 80 МВт 12° к югу	4,7 240 19	$\delta N = 30\%$ 18:16:27÷18:16:39	Излучение на 2 366 кГц, $J = 0,4$; $T = 18:16:30÷18:16:46$; $T_{\max} = 18:16:26$
17	31.05.2008 18:10:30 88	17:55÷18:15 4 300 кГц 80 МВт 12° к югу	4,6 236 17 ⁻	Не обнаруживается	Излучение на 2 366 кГц, $J = -1,1$; $T = 18:10:14÷18:10:43$; $T_{\max} = 18:10:30$
18	27.08.2009 18:03:47 39	17:53÷18:08 4 300 кГц 40 МВт вертикально	4,3 270 11	$\delta N = 80\%$ 18:03:36÷18:03:53	Излучение на 2 366 кГц, $J = 0,2$; $T = 18:03:25÷18:04:06$; $T_{\max} = 18:03:40$
19	18.04.2010 17:54:03 25	17:15÷17:55 4 300 кГц 40 МВт 12° к югу	4,7 290 5 ⁻	два дакта плотности: $\delta N_1 = 40\%$ 17:53:52÷17:54:09; $\delta N_2 = 14\%$ 17:54:09÷17:54:20	Излучение на 2 366 кГц, $J = 0,1$; $T = 17:53:40÷17:54:13$; $T_{\max} = 17:53:56$
20	28.04.2010 18:01:13 105	17:15÷17:55 4 300 кГц 50 МВт 12° к югу	5,7 225 6 ⁺	Не обнаруживается	Поле волны накачки не обнаруживается
21	14.05.2010 17:53:13 28	17:40÷17:52:30 4 785 кГц 90 МВт 12° к югу	6,0 235 5 ⁻	$\delta N = 12\%$ 17:53:02÷17:53:12	Поле волны накачки не обнаруживается
22	24.05.2010 18:00:20 102	17:50÷17:58 4 785 кГц 70 МВт 12° к югу	5,8 250 2	Не обнаруживается	Поле волны накачки не обнаруживается
23	27.05.2010 17:52:42 27	17:35÷17:50 4 785 кГц 70 МВт 12° к югу	5,3 250 4	$\delta N = 24\%$ 17:52:28÷17:52:37	Излучение на 1 881 кГц, $J = -1,6$; $T = 17:52:28÷17:52:46$; $T_{\max} = 17:52:32$

Таблица 1 (продолжение)

24	19.06.2010 17:58:56 95	17:39÷17:58:30 4 300 кГц 40 МВт 12° к югу	5,1 250 5 ⁺	Не обнаруживается	Поле волны накачки не обнаруживается
25	22.06.2010 17:51:15 37	17:31÷17:50:45 4 785 кГц 40 МВт 12° к югу	5,6 245 9	Не обнаруживается	Поле волны накачки не обнаруживается
26	18.09.2010 17:51:44 27	17:20÷17:52 4 300 кГц 50 МВт 12° к югу	3,7÷3,9 — 8 ⁺	$\delta N = 22\%$ 17:51:30÷17:51:55	Излучение на 2 366 кГц, $J = 0,8$; $T = 17:51:18\div 17:52:06$, $T_{\max} = 17:51:33$;
27	21.09.2010 17:43:59 105	17:19÷17:45 4 740 кГц 105 МВт 12° к югу	5,2 225 8 ⁺	Не обнаруживается	Излучение на 1 926 кГц, $J = -1,8$; $T = 17:43:40\div 17:44:21$; $T_{\max} = 17:43:57$
28	01.10.2010 17:50:27 15	17:20÷17:52 4 785 кГц 80 МВт 12° к югу	3,7 — 2 ⁺	Не обнаруживается	Излучение на 1 881 кГц, $J = -0,2$; $T = 17:50:00\div 17:51:07$; $T_{\max} = 17:50:18$

ля зарегистрированы не были. Во втором столбце отмечены дата проведения измерений, время T^* (UT), когда спутник находился на минимальном расстоянии D^* от оси возмущённой магнитной силовой трубки или от центра пучка мощных радиоволн при нагреве «на просвет». В третьем столбце приведены параметры нагрева плазмы: время нагрева (UT), частота и мощность излучения волны накачки, ориентация диаграммы направленности антенны станда. В четвёртом столбце представлены сведения об условиях проведения измерений: указаны значения критической частоты f_{0F_2} , высоты отражения волны накачки и суммарного за сутки индекса K_p (ΣK_p) в день измерений. Поскольку для всех сеансов значения $\Sigma K_p \leq 30$, причём в большинстве случаев $\Sigma K_p < 20$, можно считать, что все измерения выполнялись в спокойных или очень спокойных геомагнитных условиях. В пятом столбце для сеансов, в которых регистрировался дакт концентрации плазмы на высоте орбиты спутника, приведены относительное изменение концентрации плазмы в дакте δN и время его регистрации. В шестом столбце представлены характеристики электрического поля сигнала волны накачки, измеренного на боковой частоте: логарифм спектральной мощности электрического поля на боковой частоте $J = \lg I^*$ ($I^* = I/1 \text{ мкВ}^2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$), интервал времени регистрации сигнала, когда его интенсивность была выше уровня шумов, и время T_{\max} (UT), когда его интенсивность была максимальной. Следует отметить, что в большинстве случаев вне области с высокой интенсивностью сигнала (его центрального пятна) наблюдались слабые сигналы волны накачки (гало).

В качестве примера для сеанса 4, когда реализовывались условия нагрева «на просвет», на рис. 1 приведены вид спектра принимаемого сигнала в высокочастотном канале (а) и изменение во времени его интенсивности J (б). Видно появление сигнала на частоте 2 366 кГц с 18:25:46 до 18:28:32 UT с острым максимумом его интенсивности, быстрое уменьшение интенсивности после максимума со скоростью 0,4 дБ/с в первые 30 с (на расстоянии около 200 км) с более медленным её уменьшением со скоростью 0,02 дБ/с в последующие 2 мин (на расстоянии 800 км).

Анализ всего объёма полученных экспериментальных данных позволяет заключить, что сигналы волны накачки регистрировались на высоте орбиты спутника не только при нагреве «на просвет», когда строго выполнялось условие $f_{\text{ВН}} > f_{0F_2}$ (сеансы 4, 26, 28), но и в условиях, когда

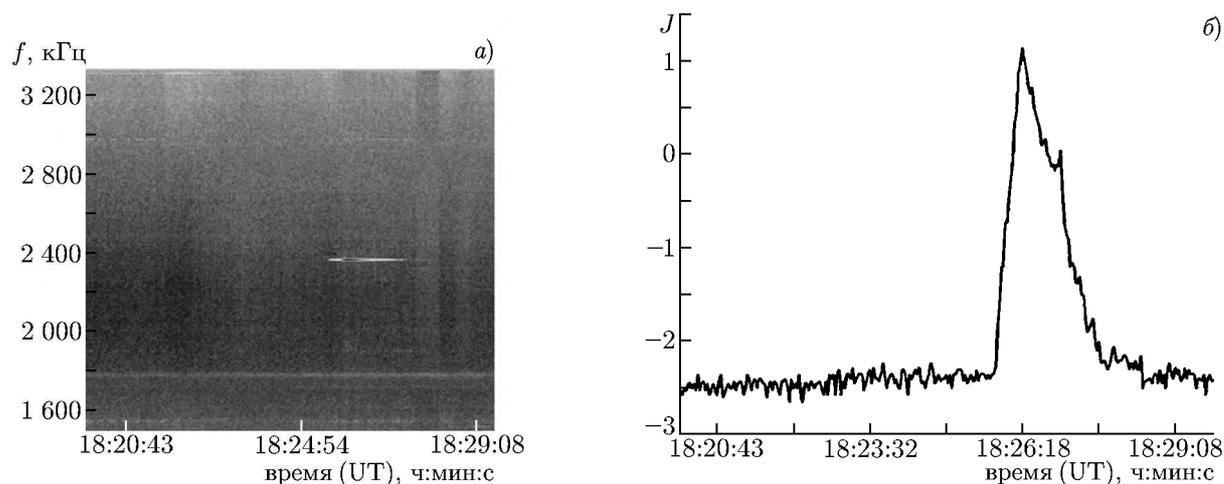


Рис. 1. Вид спектра принимаемого сигнала в полосе частот 1500÷3300 кГц (а) и изменение во времени логарифма его относительной интенсивности на частоте 2366 кГц (б) 05.09.2005 (сеанс 4, нагрев «на просвет»), $T^* = 18:26:41$ UT

частота волны накачки была ниже критической частоты f_{0F_2} невозмущённой мощным радиоизлучением ионосферы, но не больше чем на 0,5÷0,7 МГц (сеансы 1, 2, 9–11, 13, 15–19, 23 и 27). Если разность $f_{0F_2} - f_{ВН}$ превышала 0,5÷0,7 МГц, сигналы волны накачки во внешней ионосфере зарегистрированы не были (сеансы 6–8, 20–22, 24 и 25). По непонятным пока причинам сигналы волны накачки не были обнаружены в сеансе 3 при $f_{ВН} \approx f_{0F_2}$, хотя в аналогичных условиях в других сеансах они регистрировались.

Ниже представлен подробный анализ характеристик зарегистрированных сигналов на частоте волны накачки на высоте орбиты спутника. При этом для детализации картины наблюдаемого явления мы отдельно будем рассматривать случаи, когда регистрировалось появление дактов концентрации плазмы, и когда оно не регистрировалось. Следует сразу отметить, что в наших измерениях регистрировались только дакты с повышенной относительно окружающей среды концентрацией плазмы

1.3. Характеристики измеренных электрических полей при условии $f_{ВН} > f_{0F_2}$ (нагрев «на просвет»)

Анализ полученных здесь экспериментальных данных начнём с рассмотрения случаев, когда $f_{ВН} \geq f_{0F_2}$ (сеансы 4, 5, 11, 12, 14, 26 и 28). Для них в сеансах 4, 26, и 28 частота волны накачки заведомо превышала критическую частоту f_{0F_2} и выполнялось условие нагрева «на просвет». В сеансах 5, 11, 12 и 14 измерения проводились, когда частота волны накачки была порядка f_{0F_2} . Отметим также, что в сеансе 26 было зарегистрировано наличие дакта с повышенной концентрацией плазмы. Скорее всего, он был индуцирован во время настройки передатчиков с выходом излучения в эфир, которая здесь продолжалась в течение 60 мин до начала сеанса модификации ионосферы ещё при условии $f_{ВН} < f_{0F_2}$. Поскольку, как будет показано далее, существование дакта концентрации налагает свой отпечаток на характеристики принимаемого сигнала волны накачки и представляет особый интерес, ниже результаты этого сеанса измерений мы рассмотрим отдельно.

Для представления свойств регистрируемого сигнала в режиме нагрева «на просвет» сведём в табл. 2 полученные здесь экспериментальные данные. В ней в первом столбце указан номер сеанса по перечню табл. 1; во втором — частота волны накачки, значение критической частоты f_{0F_2} и

Таблица 2

Номер	$f_{\text{ВН}}$, кГц; f_{0F_2} , кГц; $P_{\text{эфф}}$, МВт	$T^*(\text{УТ})$; ч:мин:с; D^* , км	J_{max} , дБ; $T_{\text{max}} - T^*$, с;	$T_{\text{цп}} - T^*$, с; $T_{\text{рег}} - T^*$, с
4	4300 3600 80	18:26:41 73	1,2 -23	-34÷18 -55÷111
5	4300 4400 → 3900 80	18:22:59 5	0,1 -28	-34÷ -7 -42÷75
11	5480 5500 150	18:22:30 43	-1,5 -26	-74÷138 —
12	4785 ≤ 4800 120	18:22:38 34	-2,1 -10	— —
14	4300 4200÷4300 80	18:17:38 64	-0,3 3	-43÷50 -56÷56
26	4300 3700÷3,900 50	17:51:44 50	0,8 -11	-14÷1 -26÷22
28	4785 3700 80	17:50:27 40	-0,2 -9	-22÷19 -27÷40

эффективная мощность излучения, в третьем столбце приводятся время наибольшего сближения спутника с центром пучка мощных радиоволн (T^*) и минимальное расстояние до него (D^*), в четвертом — значение максимальной интенсивности принимаемого сигнала на боковой частоте $J_{\text{max}} = \lg I_{\text{max}}^*$ и время достижения этого максимума, отсчитанное от момента времени T^* . В пятом столбце указаны интервал времени регистрации наиболее интенсивного центрального пятна сигнала и полное время его регистрации, когда он превышал уровень шумов приёмной аппаратуры (все времена отсчитаны от T^*). В четвертом и пятом столбцах таблицы отрицательные значения относительных времён соответствуют положению спутника к югу относительно центра диаграммы направленности, положительные — к северу от него. Отметим, что здесь в сеансах 4 и 5 для модификации ионосферы использовался вертикальный пучок мощных радиоволн, в остальных сеансах он был наклонён на 12° к югу.

Из представленных в табл. 2 данных видно, что, даже когда строго выполнялось условие нагрева «на просвет» (сеансы 4, 26 и 28), для похожих условий эксперимента с близкими значениями D^* , $f_{\text{ВН}}$ и f_{0F_2} , значение логарифма I^* регистрируемой относительной интенсивности сигнала изменяется в очень широких пределах от 1,2 до -0,2 (приведённая напряжённость от 40 до 210 мкВ/м), что соответствует изменению интенсивности сигнала в 25 раз. В рамках линейной теории распространения радиоволн в слабо неоднородной магнитоактивной плазме это объяснить сложно. Отметим, что в сеансах 5, 11, 12 и 14, в которых частота волны накачки была близка к f_{0F_2} , интенсивность принятых на боковой частоте сигналов попадает в область более низких значений интенсивности сигнала в сеансах с нагревом «на просвет». Низкая интенсивность регистрируемого в сеансе 12 сигнала, возможно, была связана с тем, что модификация

ионосферы началась здесь только за 6 мин до пролёта спутника, и искусственная ионосферная турбулентность не успела развиваться в полной мере.

Вторым важным выводом, который следует из полученных данных, является смещение области регистрации наиболее интенсивной части принимаемого излучения (особенно области его максимальных значений) к югу на расстояние $60 \div 150$ км относительно центра диаграммы направленности излучения мощной радиоволны. Здесь большие смещения отвечают вертикальному направлению излучения. Курсовая скорость спутника составляла порядка $7,5$ км/с. Такое смещение получается, если предположить, что распространение сигнала мощной радиоволны выше максимума F_2 -слоя ионосферы происходит вдоль силовых линий геомагнитного поля. Заметим, что в ночных условиях даже при нагреве «на просвет» за счёт, например, самофокусировочной неустойчивости в плазме на высотах верхней и внешней ионосферы происходит усиление крупномасштабных (с поперечными размерами до 10 км и более) неоднородностей её концентрации. При этом можно допустить, что мощная радиоволна будет захватываться такими неоднородностями и распространяться вдоль их большой оси (т. е. вдоль линий геомагнитного поля), как это рассматривалось, например, в [15, 32, 33] в рамках модели нелинейной рефракции мощных радиоволн в неоднородной магнитоактивной плазме. Например, для сеанса 5, когда спутник прошёл близко к оси диаграммы направленности, центр яркого пятна должен регистрироваться примерно за 20 с до прохода спутника через зенит, что близко к наблюдаемой в эксперименте величине.

Из представленных в табл. 2 данных следует, что размер центрального пятна регистрируемого излучения на частоте волны накачки составляет в среднем $300 \div 400$ км. При распространении волн в свободном пространстве это соответствует линейному размеру области ионосферы на высоте орбиты, засвеченной пучком мощных радиоволн по уровню -10 дБ от максимальной мощности. Отметим, что средний размер всей области регистрации сигнала вдоль орбиты спутника (вместе с областью его гало) оказывается, в среднем, в $2 \div 3$ раза больше размера его центрального пятна.

Рассмотрим отдельно результаты измерений, полученные в сеансе 26. В этом сеансе при пролёте спутника над стендом «Сура» регистрировался дакт с повышенной концентрацией плазмы. Это могло изменить условия взаимодействия мощной радиоволны с плазмой во время последующей модификации ионосферы синхронно с пролётом спутника. На рис. 2 представлен спектр сигнала в высокочастотном канале измерителя электрического поля (а) и изменение интенсивности во времени для сигнала волны накачки, принимаемого на боковой частоте 2366 кГц (б). На рис. 2в также представлено изменение вдоль орбиты спутника концентрации ионов O^+ , полученное с помощью бортового анализатора плазмы IAP (Instrument d'analyse du plasma) [34]. Видно, что зависимость интенсивности сигнала от времени на частоте 2366 кГц имеет форму уединённого максимума с заметно более интенсивной его южной частью на интервале с $17:51:30$ до $17:51:45$ UT и максимальным логарифмом относительной интенсивности $J_{\max} = 0,8$ в $17:51:33$ UT. Дакт с повышенной концентрацией плазмы ($\delta N = (\Delta N/N_0)_{\max} \approx 22\%$) регистрировался с $17:51:27$ до $17:51:57$ UT, при этом наибольшее возрастание концентрации плазмы наблюдалось с $17:51:27$ до $17:51:43$ UT с максимумом в $17:51:36$ UT. Видно, что имеет место полное совпадение времён наиболее интенсивного сигнала на частоте 2366 кГц и наибольшего увеличения концентрации плазмы в дакте. Пространственные размеры этой области составляют порядка 100 км, что в несколько раз меньше приведённых выше характерных размеров области интенсивного сигнала, полученных в отсутствие дакта концентрации. Эти результаты ясно демонстрируют, что на высотах около 670 км максимальная интенсивность излучения мощной радиоволны регистрировалась внутри дакта с повышенной концентрацией, хотя такой дакт должен был действовать как дефокусирующая линза по отношению к сигналу волны накачки. Ниже распространение наиболее интенсивного сигнала волны накачки внутри дакта с повышенной концентрацией плазмы будет

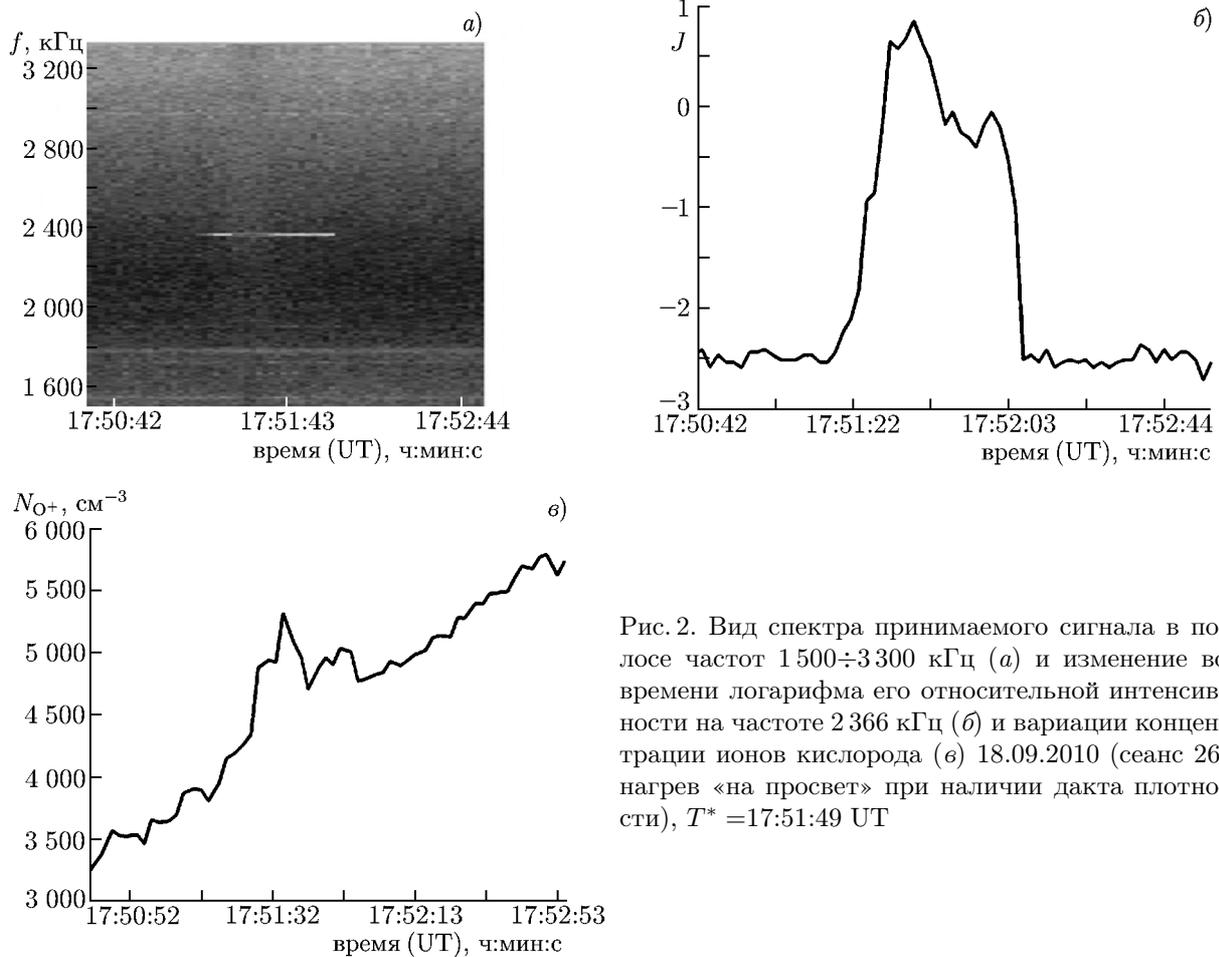


Рис. 2. Вид спектра принимаемого сигнала в полосе частот 1500÷3300 кГц (а) и изменение во времени логарифма его относительной интенсивности на частоте 2366 кГц (б) и вариации концентрации ионов кислорода (в) 18.09.2010 (сеанс 26, нагрев «на просвет» при наличии дакта плотности), $T^* = 17:51:49$ UT

подтверждено и другими примерами.

1.4. Характеристики электрических полей в случае $0 < f_{0F_2} - f_{ВН} \leq 0,5 \div 0,7$ МГц

1.4.1. Измерение полей при наличии дакта с повышенной концентрацией плазмы

Таким условиям проведения измерений соответствуют сеансы 1, 15, 16, 18, 19 и 23 в табл. 1. В табл. 3 приведены характеристики этих сеансов как по измеряемым электрическим полям сигнала на боковой частоте, так и по регистрируемым дактам с повышенной концентрацией плазмы. Следует отметить, что в наших экспериментах всегда наблюдалось формирование дактов только с повышенной концентрацией плазмы. В случае сеанса 19 дакт имел «двугорбую» форму с минимумом концентрации посередине. В табл. 3 в первом столбце указан номер сеанса по перечню табл. 1; во втором столбце приведены частота волны накачки, критическая частота f_{0F_2} и эффективная мощность излучения. В третьем столбце приводится время наибольшего сближения спутника с центром пучка мощных радиоволн и минимальное расстояние до него; в четвертом — максимальная интенсивность принимаемого сигнала на боковой частоте $J_{\max} = \lg I_{\max}^*$, интервал времени регистрации центрального пятна ($T_{\text{цп}} - T^*$), определённого по критерию $T_{\text{цп}} = T_2(J = J_{\max} - 1) - T_1(J = J_{\max} - 1)$, и время максимальной интенсивности в нём ($T_{\text{цп max}} - T^*$). В пятом столбце указаны относительное увеличение концентрации плазмы в дакте,

Таблица 3

Номер сеанса	$f_{ВН}$, кГц; f_{0F_2} , кГц; $P_{эфф}$, МВт	$T^*(UT)$; ч:мин:с; D^* , км	J_{max} , дБ; $T_{цп} - T^*$, с; $T_{цп max} - T^*$, с	δN_{max} ; $T_{дакта} - T^*$, с; $T_{max дакта} - T^*$, с
1	4 600 5 200 100	18:25:36 26	-0,7 -2÷7 0	40 % -4÷7
15	4 300 5 000 80	18:16:28 21	1,2 -8÷3 -5	75 % -7÷4 0
16	4 300 4 700 80	18:16:28 40	0,4 5÷10 7	30 % -1÷11 5
18	4 300 4,300 40	18:03:47 39	0,2 -10÷ - 1 -7	80 % -11÷6 -4
19	4 300 4 700 40	17:54:03 25	0,1 -15÷1 -7	дакт 1: 40 % -11÷6 -2 дакт 2: 14 % 6÷17 12
23	4 785 5 300 70	17:52:42 27	-1,6 -12÷7 -10	24 % -14÷ - 5 -12

интервал времени регистрации дакта и время наблюдения наибольшего изменения концентрации плазмы в нём (времена отсчитываются от момента T^*). Отметим, что только сеанс 18 выполнялся при ориентации диаграммы направленности в зенит, все остальные сеансы проводились при наклоне диаграммы направленности излучения антенны стенда на 12° к югу для усиления генерации искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта магнитного зенита [12, 28].

На основании представленных в табл. 3 данных можно сделать следующие выводы. Во-первых, во всех этих сеансах время максимального увеличения концентрации зарегистрированных дактов практически совпадает с временем T_* . Это указывает на то, что дакт формируется вдоль оси возмущённой магнитной силовой трубки, которая опирается на область с высоким уровнем искусственной ионосферной турбулентности, возбуждаемой в центре пучка мощных радиоволн вблизи уровня отражения волны накачки. Размер дактов вдоль орбиты спутника (почти в ортогональном к геомагнитному полю направлении) можно оценить как $80 \div 110$ км. Во-вторых, размер наиболее интенсивного центрального пятна излучения на боковой частоте совпадает с размером дакта или может быть даже немного меньше него. Область с интенсивным излучением находится внутри дакта, в то время как его более слабое гало регистрируется и вне него на расстоянии 300 км и дальше вдоль орбиты спутника. При этом более слабое гало либо располагается симметрично относительно оси дакта, либо может быть несколько смещено в южном или северном направлениях. В-третьих, не обнаруживается какой-либо определённой зависимости между максимальной интенсивностью излучения на боковой частоте сигнала волны накачки и величиной зарегистрированного изменения концентрации плазмы в дакте в пределах от 20 % до 80 %. Сама нормированная максимальная интенсивность J_{max} может изменяться в широких пределах

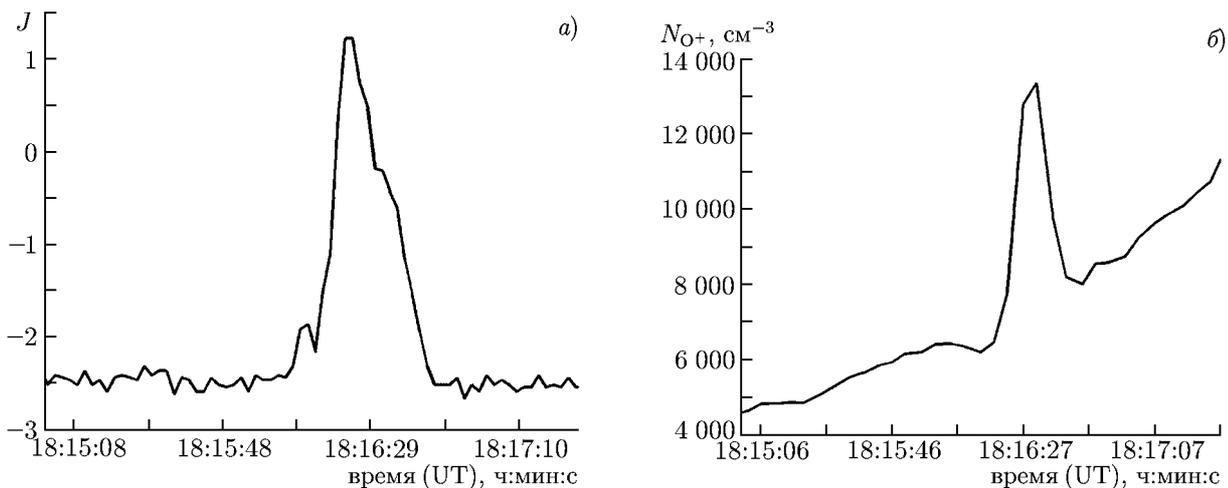


Рис. 3. Изменение во времени логарифма относительной интенсивности сигнала на частоте 2366 кГц (а) и концентрации ионов кислорода (б) 12.05.2008 (сеанс 15, нагрев в условиях $f_{0F_2} - f_{ВН} \approx 0,7$ МГц при наличии дакта концентрации), $T^* = 18:16:28$ UT

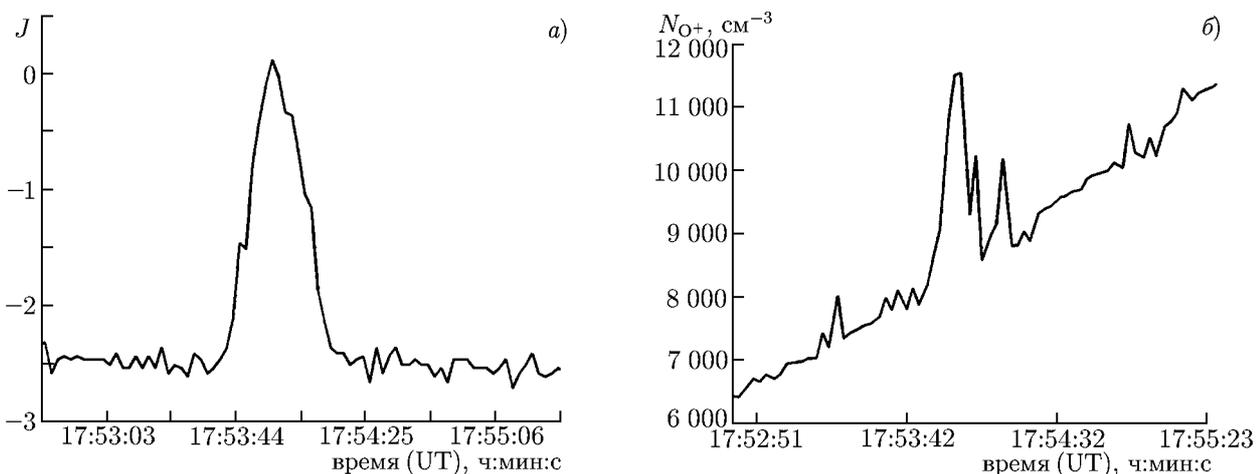


Рис. 4. Изменение во времени логарифма относительной интенсивности сигнала на частоте 2366 кГц (а) и вариации концентрации ионов кислорода (б) 18.04.2010 (сеанс 19, нагрев в условиях $f_{0F_2} - f_{ВН} \approx 0,4$ МГц при наличии двух дактов концентрации с минимумом концентрации плазмы между ними), $T^* = 17:54:03$ UT

от $-1,6$ до $+1,2$ (т. е. интенсивность излучения изменяется почти на три порядка). По полученным данным можно сделать вывод о наличии тенденции уменьшения интенсивности принимаемого сигнала с ростом частоты волны накачки, что естественно связывать с увеличивающимся ослаблением сигнала в фильтрах прибора ИСЕ.

Для демонстрации характера поведения сигнала волны накачки во внешней ионосфере при наличии дакта концентрации плазмы мы выбрали два сеанса измерений (сеансы 15 и 19), в которых спутник пролетал на близких расстояниях (21 и 25 км) от центра возмущённой силовой магнитной трубки. В этих сеансах диаграмма направленности излучения стенда была наклонена на 12° на юг от вертикали. Для каждого сеанса на рис. 3 и 4 на панелях (а) представлены результаты измерений логарифма относительной интенсивности волны накачки J ; на панелях (б) показаны

результаты измерений прибором IAP концентрации ионов кислорода O^+ плазмы, которые преобладают во внешней ионосфере на высотах около 670 км. В подписях к рисункам указано время наибольшего сближения спутника с центром возмущённой магнитной силовой трубки, опирающейся на область наиболее сильного разогрева плазмы вблизи высоты отражения волны накачки в F_2 -области ионосферы.

В сеансе 15 (см. рис. 3) стенд излучал с мощностью $P_{эфф} \approx 100$ МВт на частоте $f_{ВН} = 4,3$ МГц, которая была на 0,7 МГц ниже критической частоты f_{0F_2} . Минимальное расстояние от спутника до центра возмущённой магнитной силовой трубки составляло 21 км для $T^* = 18:16:28$ UT. Наблюдалось формирование дакта с относительным увеличением концентрации плазмы $\delta N \approx 75\%$ (по сравнению с концентрацией окружающей плазмы). Дакт имел форму уединённого максимума и регистрировался с 18:16:21 до 18:16:32 UT с максимумом δN в 18:16:28 UT (в момент наибольшего сближения с осью возмущённой магнитной силовой трубки). Сигнал волны накачки на зеркальной частоте 2366 кГц регистрировался с 18:15:59 до 18:16:42 UT; здесь центральное пятно наиболее сильного сигнала наблюдалось с 18:16:20 до 18:16:31 UT с максимумом логарифма его относительной интенсивности $J = 1,2$ в 18:16:23 UT, для которого напряжённость электрического поля составляла 227 мкВ/м. Эта величина близка к наибольшему значению напряжённости поля, измеренному в сеансах в режиме излучения волны накачки «на просвет». Из полученных данных можно заключить, что центральное пятно наиболее интенсивного сигнала на боковой частоте волны накачки было несколько смещено к южной границе дакта, при этом размер области более слабого ореола излучения был почти в 4 раза больше ширины дакта, что соответствует расстоянию около 300 км вдоль орбиты спутника. Отметим, что этот сеанс является выделенным, поскольку он характеризуется высоким значением интегрального электронного содержания в ионосфере [35] и повышенным уровнем энергичных электронов, зарегистрированных на орбите спутника прибором IDP (Instrument for the detection of particles). Также в этом сеансе, согласно [36], наблюдалось возбуждение магнитосферного мазера путём формирования искусственного дакта концентрации мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура».

В сеансе 19 (см. рис. 4) стенд излучал с мощностью $P_{эфф} \approx 40$ МВт на частоте $f_{ВН} = 4,3$ МГц, которая была на 0,4 МГц ниже критической частоты f_{0F_2} . Минимальное расстояние от спутника до центра возмущённой магнитной силовой трубки составляло 25 км для $T^* = 17:54:03$ UT. Наблюдалось формирование дакта с относительным увеличением концентрации $\delta N \approx 40\%$. Этот дакт регистрировался с 17:53:52 до 17:54:09 UT с максимумом δN в 17:54:01 UT. Кроме того, с 17:54:09 до 17:54:20 UT регистрировался повторный более слабый максимум с $\delta N \approx 14\%$ в 17:54:15 UT. Между этими двумя максимумами находится область с минимумом концентрации плазмы в $T_{min} = 17:54:09$ UT. 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 регистрировался на южном краю наиболее сильного дакта, заведомо вне области минимума концентрации плазмы между двумя дактами. Максимальное значение логарифма относительной интенсивности сигнала волны накачки для этого сеанса составляла $J = 0,1$ ($E = 64$ мкВ/м), что соответствует измеренным значениям напряжённости электрического поля для режима излучения волны накачки «на просвет». Размер области сигнала с низкой интенсивностью (его гало) был в 2 раза больше ширины основного дакта, примерно 250 км вдоль орбиты спутника. При этом гало смещено на север относительно центрального пятна.

Подводя итоги рассмотренных выше, а также и других выполненных нами измерений (см. табл. 3), можно заключить, что при наличии дакта с повышенной концентрацией плазмы область наиболее интенсивного сигнала на боковой частоте волны накачки имеет размеры около 70 км

и находится внутри дакта. Напряжённость электрического поля для этого сигнала изменяется в пределах $25 \div 230$ мкВ/м, что соответствует значениям напряжённости электрического поля, измеренным в режиме излучения волны накачки «на просвет». Помимо области интенсивного сигнала всегда можно выделить область менее интенсивного гало, размеры которого в $2 \div 4$ раза превосходят размеры дакта. Эта область может располагаться либо симметрично относительно дакта, либо она может быть несколько смещена в северном или южном направлениях. Особо следует отметить сеанс 19, в котором дакт имел двугорбую форму с минимумом концентрации плазмы посередине. Даже в этом случае максимум интенсивности принимаемого сигнала находился не в области минимума концентрации плазмы (в области возможной его фокусировки), а в области основного дакта с повышенной концентрацией плазмы, что не соответствует представленным в [27] данным.

1.4.2. Измерение полей в случае, когда дакт с повышенной концентрацией плазмы не регистрировался

Данному условию измерений отвечают сеансы 2, 9–11, 13, 17 и 27 в табл. 1. Важно подчеркнуть, что во всех случаях, когда не регистрировался дакт концентрации плазмы, орбита спутника проходила на расстоянии больше 40 км от центра возмущённой силовой магнитной трубки. В этом случае, согласно [31], расстояние оказывается слишком большим для обнаружения дакта, хотя ионосферные условия в этих сеансах отвечают условиям его формирования во внешней ионосфере. Поэтому с высокой вероятностью можно допустить, что и в них формирование дакта плотности плазмы имело место, но орбита спутника проходила вне дакта.

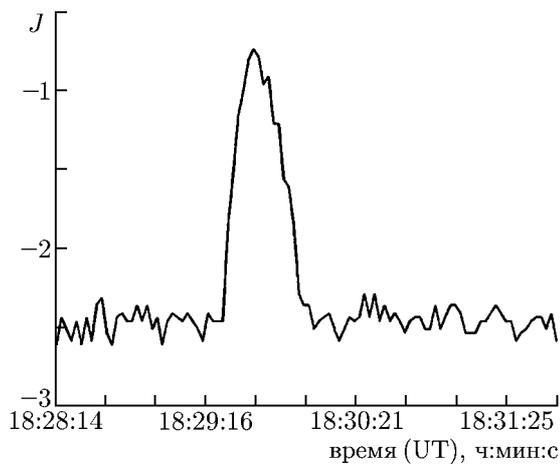


Рис. 5. Изменение во времени логарифмической интенсивности сигнала на частоте 2366 кГц 24.08.2007 (сеанс 13, нагрев в условиях $f_{0F_2} - f_{ВН} \approx 0,4$ МГц в отсутствие дакта плотности), $T^* = 18:29:42$ UT

жённости измеряемого поля при близких значениях D^* . Это является свидетельством того, что на результаты измерений структуры поля на частоте волны накачки на высоте орбиты спутника существенное влияние должны оказывать факторы, которые вызывают сильные вариации интенсивности принимаемого сигнала.

Следует отметить, что максимум напряжённости электрического поля практически всегда находился в точке наибольшего сближения спутника с центром возмущённой магнитной силовой трубки. Как видно из приведённых в табл. 1 данных, величина логарифма относительной интенсивности J в этих сеансах варьировалась в пределах от $-0,5$ до $-2,0$ и была, в среднем, на $10 \div 15$ дБ слабее, чем в рассмотренных в разделе 1.4.1. сеансах, когда спутник пролетал близко к оси дакта. Полученные экспериментальные данные не показывают какой-либо значимой зависимости измеренной напряжённости электрического поля волны накачки от минимального расстояния до центра возмущённой трубки: для достаточно отличающихся значений $D^* \approx 60$ км или $D^* \approx 105$ км измеренные поля лежат в практически одинаковых пределах $J = -(0,5 \div 2,0)$ ($E = 6 \div 32$ мкВ/м) и $J = -(0,7 \div 1,8)$ ($E = 7 \div 25$ мкВ/м) соответственно. Здесь опять обращает на себя внимание большой разброс напряжённости электрического поля.

Следует заметить, что, в среднем, величина измеренной напряжённости электрического поля выше при меньшей разности между частотами f_{0F_2} и $f_{ВН}$ и имеет место тенденция уменьшения интенсивности принимаемого сигнала с ростом $f_{ВН}$. Последнее, как и прежде, естественно связывать с ослаблением принимаемого сигнала в фильтрах прибора ICE.

Форма принимаемого сигнала (см. рис. 5, на котором в качестве примера приведён сигнал для сеанса 13) в этом случае имела вид уединённого максимума. Сигнал волны накачки наблюдался, в среднем, на расстоянии около 200 км вдоль орбиты спутника. Он не имел каких-либо дополнительных боковых структур или протяжённого гало, как в случае пролёта спутника вблизи центра возмущённой магнитной силовой трубки. Это объясняется тем, что здесь максимальная напряжённость измеренного электрического поля была слабее на 14 дБ и более напряжённости поля в случае, когда спутник пролетал вблизи оси дакта. Поэтому, если аналогичные структуры здесь и существуют, их амплитуда не превышала уровня шумов, и, следовательно, они не могли быть разрешены аппаратурой спутника.

Результаты, полученные в этом и в предыдущем разделах, позволяют заключить, что на высоте орбиты спутника форма наиболее интенсивного центрального пятна регистрируемого на частоте волны накачки сигнала близка к круговой с диаметром около 100 км. Его угловой размер составляет порядка $8,5^\circ$, что почти в 2 раза меньше ширины диаграммы направленности излучения волны накачки. Последнее может указывать или на наличие фокусировки пучка мощных радиоволн при их распространении во внешнюю ионосферу, или на ограничение по тем или иным причинам его углового размера. Анализ полученных экспериментальных данных также позволяет утверждать, что максимальное расстояние D^* , на котором аппаратурой DEMETER ещё обнаруживался сигнал на боковой частоте волны накачки, не превышало $160 \div 210$ км.

2. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рассмотренных исследованиях обнаружен ряд экспериментальных фактов. Из них в первую очередь требуют интерпретации следующие:

- 1) регистрация электрического поля на частоте волны накачки во внешней ионосфере, когда частота мощной радиоволны О-поляризации была меньше критической частоты f_{0F_2} , но не больше, чем на $0,5 \div 0,7$ МГц;
- 2) высокая интенсивность прошедших во внешнюю ионосферу волн (порядка интенсивности волн, зарегистрированных при излучении мощной радиоволны «на просвет»);
- 3) большие вариации интенсивности принимаемого сигнала для близких условий измерений;
- 4) совпадение пятна с наибольшей интенсивностью сигнала и дакта с повышенной концентрацией плазмы.

Регистрация сигнала в случае, когда выполнено соотношение $f_{0F_2} - f_{ВН} \lesssim 0,5 \div 0,7$ МГц $\approx 0,5 f_{ce}$ ($f_{ce} \approx 1,35$ МГц — гирочастота электронов в области взаимодействия мощной радиоволны О-поляризации с плазмой над стендом «Сура»), и отсутствие сигнала, если $f_{0F_2} - f_{ВН} > 0,7$ МГц, может указывать на трансформацию О-волны в медленную Х-волну (Z-моду) [19–21]. Здесь наиболее эффективной следует считать прямую конверсию О-моды в Х-моду в «окне прозрачности», когда О-волна распространяется в плоскости геомагнитного меридиана под критическим углом $\theta_{кр} = \arcsin\{[Y/(1+Y)]^{1/2} \sin \alpha\}$ к вертикали, где α — угол между геомагнитным полем и вертикалью, а $Y = f_{ce}/f_{ВН}$ [19, 20, 37]. В естественной ионосфере этот эффект известен как «утраивание» отражённого от ионосферы зондирующего сигнала, когда на ионограммах вертикального зондирования ионосферы одновременно наблюдается появление О-, Х- и Z-мод [19, 38].

В экспериментах на стенде «Сура» для $f_{ВН} = 4,3$ МГц, $f_{ce} = 1,35$ МГц и $\alpha = 19^\circ$ величина

критического угла составляет $\theta_{кр} \approx 9,2^\circ$ с отклонением к югу от вертикали. Значение $\theta_{кр}$ близко к часто используемому нами углу 12° для излучения пучка мощных радиоволн. Эффективность процесса прямой конверсии близка к 100%. Однако, согласно [20, 37, 38], угловой размер «окна прозрачности» в зависимости от ионосферных условий составляет всего $1^\circ \div 3^\circ$, что много меньше размеров пучка мощных радиоволн $12^\circ \div 15^\circ$. Следовательно, лишь небольшая часть энергии волны накачки может пройти через такое «окно» дальше, чем высота её отражения. Эта проблема снимается, если учесть, что при длительной модификации ночной ионосферы возбуждаются интенсивные неоднородности километровых масштабов [10], которые способны привести к заметной рефракции распространяющейся в возмущённой области ионосферы мощной радиоволны. Важно, что эти неоднородности имеют наибольшую интенсивность в области магнитного зенита для волны накачки [12, 39]. Согласно [40], такие неоднородности формируют дополнительные «окна прозрачности» и трансформация $O \rightarrow X$ становится возможной в большей части возмущённой области, что значительно увеличивает интегральную эффективность прямой конверсии. Естественно, для полного развития таких крупномасштабных неоднородностей требуется достаточно длительная (минуты и больше) модификация ионосферы.

Рассматривая процесс прямой конверсии необходимо, однако, учитывать тот факт, что, если мощная радиоволна O -поляризации отражается в F_2 -слое ионосферы, то у медленной X -волны выше максимума F_2 -слоя имеется точка резонанса, где частота волны накачки равна плазменной. В этой точке X -волны трансформируются в ленгмюровские электростатические колебания, которые быстро затухают из-за их сильного поглощения [19]. В нашем случае на высоте орбиты спутника плазменная частота ниже частоты волны накачки. Следовательно, X -волны не могут достичь таких высот и их прямая регистрация бортовой аппаратурой спутника невозможна, а обратная трансформация $X \rightarrow O$ малоэффективна из-за сильного поглощения X -волн при резонансе. Поэтому необходимо рассматривать иную, чем двойная трансформация $O \rightarrow X \rightarrow O$, возможность объяснения рассмотренных в работе экспериментальных данных.

Как уже было отмечено во Введении, в ночной ионосфере вблизи высоты отражения волны накачки происходит образование полости с пониженной концентрацией плазмы. Такая полость, согласно приведённым в [13] результатам радиотомографических измерений, имеет в поперечнике размер около 100 км и вытянута вдоль геомагнитного поля примерно на 200 км. Она действует как линза, которая фокусирует пучок мощных радиоволн [41]. Следуя [27, 30], фокусное расстояние такой линзы можно оценить как 100 км. Такая полость с пониженной концентрацией плазмы может также поворачивать направление распространения пучка мощных радиоволн вдоль силовых линий геомагнитного поля. Это приводит к смещению области с интенсивным радиоизлучением на частоте волны накачки к югу относительно оси пучка излучённых стеном мощных радиоволн на расстояние порядка 60 км при угле излучения пучка мощных радиоволн 12° и 150 км при вертикальном направлении излучения. Эти оценки смещения пятна находятся в полном соответствии с результатами представленных в работе измерений.

В силу нерегулярной формы такой линзы она в разных условиях эксперимента имеет разное фокусное расстояние (или разную степень фокусировки на заданном расстоянии), а фокусное пятно должно быть размытым и может несколько отклоняться от осевой линии возмущённой магнитной силовой трубки (или осевой линии дакта). Это объясняет наблюдаемые сильные вариации интенсивности принимаемого сигнала в различных измерениях в, казалось бы, схожих условиях. Если частота волны накачки близка к f_{0F_2} , такое уменьшение концентрации плазмы может привести к эффекту «продавливания» слоя плазмы, вследствие чего образуется «дыра» в ионосфере, через которую мощная радиоволна O -поляризации прямо проходит во внешнюю ионосферу, как это рассматривалось, например, в [18, 33]. Поскольку уменьшение концентрации плазмы в такой полости может составлять до $10 \div 30\%$ относительно первоначальной концентра-

ции в максимуме слоя, этот эффект возможен, если частота волны накачки будет ниже частоты f_{0F_2} не более, чем на $5 \div 15\%$. Для $f_{ВН} = 4,3$ МГц, она должна отличаться от f_{0F_2} на $0,2 \div 0,6$ МГц, что несколько меньше измеренной разности в $(0,5 \div 0,7)f_{ce}$, но соответствует этой величине для максимальных значений уменьшения концентрации плазмы.

Заметим, что для формирования такой полости необходимо длительная ($5 \div 10$ мин) модификация ионосферы и высокая мощность волны накачки, а приведённые выше большие изменения концентрации плазмы достигаются только в условиях ночной ионосферы. Очевидно, что размеры «дыры» будут определяться размерами диаграммы направленности излучения станда, в первую очередь её центральной частью, как это, например, было зарегистрировано в [13, 39, 42]. Поддержание в такой дыре нагрева плазмы и уровня искусственной турбулентности будет продолжаться, пока плазменная частота в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой будет оставаться для $f_{ВН} = 4300$ кГц выше $4,1$ МГц [43].

Кроме формирования такой полости с пониженной концентрацией плазмы модификация ионосферы мощной радиоволной О-поляризации приводит к генерации искусственных неоднородностей концентрации плазмы с километровыми масштабами, наиболее интенсивных в области магнитного зенита. Относительное уменьшение концентрации плазмы в них может достигать 10% [10, 39]. Эти неоднородности приводят к появлению локальных областей с более сильным уменьшением концентрации плазмы, в которых условие $f_{0F_2} - f_{ВН} \approx 0,5 \div 0,7$ МГц уже вполне достижимо; ионосфера становится полупрозрачной, и волны с частотами ниже f_{0F_2} проходят во внешнюю ионосферу. Этот эффект хорошо обнаруживается на ионограммах вертикального зондирования ионосферы при развитии мощного F -рассеяния. Так, например, в [44] отмечалось, что в таких условиях появляются отражения с действующих высот, превышающих даже высоты для Z -моды распространения. При этом по частотной ширине F -рассеяния (F_{spread}) можно дать оценку вариациям плотности плазмы в неоднородностях километровых масштабов как $\delta N = \Delta N/N \approx 10 \div 15\%$, что полностью соответствует приведённым выше значениям. Детальное сопоставление характеристик Z -моды распространения и F_{spread} в условиях модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением является отдельной задачей, решение которой выходит за рамки настоящей работы. Совместное влияние уменьшения концентрации плазмы в масштабе диаграммы направленности и генерации крупномасштабных неоднородностей на эффективность просачивания радиоволны во внешнюю ионосферу рассматривалось также в [33]. Выполненное в [45] моделирование распространения радиоволн в среде с крупномасштабным изменением концентрации плазмы показало, что форма распределения интенсивности мощной радиоволны будет в сильной степени зависеть от величины изменения концентрации плазмы, размеров и формы образующейся полости.

В рамках рассмотренной модели прохождения излучения на частоте волны накачки во внешнюю ионосферу за счёт уменьшения концентрации плазмы и генерации искусственных крупномасштабных неоднородностей при модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением можно объяснить отмеченные выше основные свойства полученных экспериментальных данных. В первую очередь, это касается частотного интервала регистрации сигнала во внешней ионосфере ($f_{0F_2} - f_{ВН} \leq 0,5 \div 0,7$ МГц), высокой интенсивности излучения, принимаемого бортовой аппаратурой спутника, и его сильной изменчивости, а также совпадения направления уходящего во внешнюю ионосферу излучения с направлением магнитного поля Земли. Предложенный механизм объясняет и отсутствие регистрации сигнала волны накачки во внешней ионосфере в дневных условиях, поскольку при этом уровень искусственной турбулентности, формирование области с пониженной концентрацией плазмы и развитие неоднородностей её концентрации оказываются подавленными по сравнению с условиями измерений в вечерней или в ночной ионосфере.

Справедливость предложенного механизма, вообще говоря, следует подтвердить расчётами лучей в условиях сильного развития крупномасштабных искусственных неоднородностей концентрации плазмы. Однако прежде чем выполнять такие расчёты, следует провести простые измерения, которые дадут необходимую дополнительную информацию о роли как километровых неоднородностей, так и фокусирующей линзы в формировании поля на частоте волны накачки во внешней ионосфере. В первую очередь следует провести измерения при различной длительности излучения волны накачки. При достаточно коротких ($1 \div 10$ с) импульсах волны накачки, когда возможна прямая конверсия $O \rightarrow X$ в естественном «окне прозрачности» и возбуждаются мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности, но не возбуждаются крупномасштабные километровые структуры, и при импульсах с длительностью $1 \div 2$ мин, когда успевают развиваться километровые неоднородности, но полость с уменьшенной концентрацией плазмы ещё полностью не сформирована. Важно также провести измерения при различных уровнях мощности волны накачки, чтобы определить влияние различных нелинейных эффектов на наблюдаемое явление. Выполнение этих исследований позволит построить более полную картину наблюдаемого явления и детализировать механизмы, лежащие в основе проникновения мощной радиоволны в закритическую плазму. Однако для их осуществления необходимо наличие спутника с соответствующей этим задачам аппаратурой. Такие измерения будут возможны, в частности, с канадским спутником CASSIOPE, запуск которого планируется в 2013 году.

3. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Рассмотренные в работе результаты измерений поля волны накачки во внешней ионосфере (на высоте орбиты спутника 670 км) основываются на многочисленных экспериментальных данных, полученных в различных ионосферных условиях в течение всей миссии спутника DEMETER. Они позволили установить, что в условиях, когда частота волны накачки ниже критической частоты f_{0F_2} , но не более, чем на $0,5 \div 0,7$ МГц, напряжённость электрического поля во внешней ионосфере (в закритической плазме) может быть порядка напряжённости поля при нагреве «на просвет». Это означает, что в таких условиях заметная часть мощности волны накачки может проходить сквозь ионосферу. Вследствие этого изменяются условия генерации искусственной ионосферной турбулентности, происходит ослабление её интенсивности на уровне отражения волны накачки и может стимулироваться генерация плазменной турбулентности на больших высотах.

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 [31, 46, 47]. В работе [31] наблюдалось ухудшение образования дактов концентрации плазмы, когда частота волны накачки была лишь немного ниже f_{0F_2} ; в работе [46] по измерениям брэгговского рассеяния регистрировался срыв генерации искусственных мелкомасштабных неоднородностей в центре диаграммы направленности; в работе [47] в таких же условиях область оптического свечения приобретала форму кольца с исчезновением свечения в центре диаграммы направленности. Измерения плазменной турбулентности, возбуждаемой на высотах, превышающих уровень отражения волны накачки, были отмечены в работе ранее.

Представленные в работе результаты были получены не в рамках целенаправленных экспериментов, а по итогам обработки измерений характеристик искусственной ионосферной турбулентности во внешней ионосфере, выполненных с помощью спутника DEMETER, в которых необходимо было обеспечить возбуждение интенсивной турбулентности на уровне отражения волны накачки. Сейчас ясно, что для построения более полной картины наблюдаемого явления и детализации механизмов, лежащих в основе наблюдаемого проникновения мощной радиоволны

в закритическую плазму, надо выполнить отмеченные выше дополнительные специальные эксперименты.

Как уже отмечалось выше, результаты наших измерений противоречат выводам работы [27], в которой обнаруженное усиление сигнала волны накачки на высотах орбиты спутника связывается с фокусировкой пучка мощных радиоволн в дакте с пониженной концентрацией плазмы. В нашем случае интенсивный сигнал волны накачки наблюдался внутри дакта с повышенной концентрацией плазмы, в котором он, вообще говоря, должен был испытывать дефокусировку и, наоборот, не обнаруживалось влияния фокусировки луча в структурах с пониженной концентрацией плазмы между её двумя локальными максимумами. Кроме того, полученные нами экспериментальные данные (см. раздел 1.4.1) не показывают зависимости интенсивности принимаемого сигнала от величины приращения концентрации плазмы в дакте, т. е. от силы дефокусирующей линзы. Можно предположить, что эффект дефокусировки мощной радиоволны в дакте с повышенной концентрацией плазмы компенсируется за счёт эффекта фокусировки пучка мощных радиоволн в полости с пониженной концентрацией плазмы (фокусирующей линзой), образующейся при вытеснении плазмы из области сильного разогрева при резонансном взаимодействии мощной радиоволны О-поляризации с плазмой. Поскольку, как следует из модели образования дактов за счёт вытеснения плазмы из разогретой мощной радиоволной F_2 -области ионосферы [48], дакт тем сильнее, чем больше плазмы вытеснено, т. е. образуется более сильная фокусирующая линза. Здесь, как рассматривалось выше, вытянутая вдоль геомагнитного поля область с сильным (до 30 %) обеднением плазмы (фокусирующая линза) приводит к отклонению пучка мощных радиоволн к линиям магнитного поля и к его фокусировке, которая затем может частично компенсироваться его дефокусировкой при распространении вдоль дакта. При этом часть мощных радиоволн, не захваченных фокусирующей линзой, формирует гало сигнала волны накачки на высоте орбиты спутника, положение и размеры которого определяются диаграммой направленности излучения мощных радиоволн и рефракционными эффектами.

В работе [27] утверждается также, что около частоты волны накачки в спектре принятого сигнала регистрируется слабое излучение в полосе частот приблизительно $[f_{\text{ВН}} - 60 \text{ кГц}, f_{\text{ВН}} + 60 \text{ кГц}]$, которое авторы связывают с генерацией искусственного радиоизлучения ионосферы [49, 50]. С нашей точки зрения, динамического диапазона приёмника в 42 дБ явно недостаточно для регистрации искусственного радиоизлучения, и этот сигнал, скорее всего, имеет иную природу. В представленных в данной работе измерениях такие сигналы зарегистрированы не были.

В заключение отметим, что во время пролёта спутника через возмущённую магнитную силовую трубку помимо сигнала волны накачки на боковой частоте, характеристики которого исследовались в настоящей работе, часто в спектре принимаемого излучения регистрировался сигнал на частоте около 250 кГц. Иногда регистрировались сигналы и на других частотах, появление которых также коррелировало с работой стенда «Сура». Вопрос об их природе сегодня остаётся открытым.

Авторы выражают благодарность сотрудникам стенда «Сура» за помощь в проведении экспериментов по программе «Сура»—DEMETER. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-02-00374, 13-02-12074).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11.
2. J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44, No. 12.

3. J. Atmos. Terr. Phys. 1985. V. 47, No. 12.
4. J. Atmos. Terr. Phys. 1997. V. 59, No. 18.
5. Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 5.
6. Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 42, № 7, № 8.
7. Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 9.
8. Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11.
9. Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2.
10. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
11. Stubbe P., Hagfors T. // *Surveys Geophys.* 1997. V. 18. P. 57.
12. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
13. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // УФН. 2007. Т. 17, № 3. С. 330.
14. Беликович В. В., Грач С. М., Караштин А. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545.
15. Kesrinen M. J., Chaturvedi P. K., Ossakov S. L. // *Radio Sci.* 1993. V. 28, No. 5. P. 775.
16. Djuth F. T. // *Adv. Space Res.* 1989. V. 9, No. 5. P. 123.
17. Залисовский А. В., Кашеев С. Б., Ямпольский Ю. М. и др. // Радиофизика и радиоастрономия. 2004. Т. 9, № 3. С. 261.
18. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере.* М.: Наука, 1973.
19. Гинзбург В. Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме.* М.: Наука, 1967.
20. Mjølhus E. // *J. Plasma Phys.* 1984. V. 31, No. 1. P. 7.
21. Mishin E., Hagfors T., Kofman W. // *J. Geophys. Res. A.* 1997. V. 102, No. 12. P. 27 265.
22. Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 9. С. 1 273.
23. Rose G., Grandal B., Neske E., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 1985. V. 90, No. 3. P. 2 851.
24. Gelinas L. J., Kelley M. C., Sulzer M. P., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 2003. V. 108, No. 10. P. 1 382.
25. *Planetary Space Sci.* 2006. V. 54, No. 5.
26. Frolov V. L., Rapoport V. O., Shorokhova E. A., Parrot M. // Тез. докл. Первой украинской конф. «Электромагнитные методы исследования окружающего пространства». Харьков, 2012. <http://ri.kharkov.ua/emes>.
27. Milikh G. M., Vartanyan A., Papadopoulos K., Parrot M. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73, No. 13. P. 1 674.
28. Гуревич А. В., Зыбин К. П., Карлсон Х. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 9. С. 772.
29. Berthelier J. J., Godefroy M., Leblanc F., et al. // *Planetary Space Sci.* 2006. V. 54, No. 5. P. 456.
30. Бойко Г. Н., Васьков В. В., Голян С. Ф. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 8. С. 960.
31. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, вып. 12. С. 908.
32. Gurevich A., Carlson H., Kelley M., et al. // *Phys. Lett. A.* 1999. V. 251. P. 311.
33. Guzdar P. N., Chaturvedi P. K., Papadopoulos K., Ossakov S. L. // *J. Geophys. Res. A.* 1998. V. 103, No. 2. P. 2 231.
34. Berthelier J. J., Godefroy M., Leblanc F., et al. // *Planetary Space Sci.* 2006. V. 54, No. 5. P. 487.
35. <http://www.izmiran.ru/services/iweather/>.
36. Марков Г. А., Белов А. С., Фролов В. Л. и др. // ЖЭТФ. 2010. Т. 138, вып. 6. С. 1 037.
37. Mjølhus E., Flå T. // *J. Geophys. Res. A.* 1984. V. 89, No. 6. P. 3 921.
38. Митяков Н. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 11, № 2. С. 159.

39. Терещенко Е. Д., Миличенко А. Н., Фролов В. Л., Юрик Р. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 934.
40. Leyser T. B., Nordblad E. // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. Art. no L24105.
41. Бенедиктов Е. А., Гончаров Н. П., Игнатъев Ю. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27, № 1. С. 12.
42. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L., et al. // Radio Sci. 2012. V. 47. Art. no RS0L15.
43. Blagoveshchenskaya N. F., Borisiva T. D., Kornienko V. A., et al. // Adv. Space Res. 2006. V. 48. P. 2503. DOI:10.1016/j.asr.2004.12.008.
44. Выборнов Ф. И., Митякова Э. Е., Рахлин А. В. Отклик ионосферы на возмущение мощной радиоволной: Препринт № 376 НИРФИ. Нижний Новгород, 1993.
45. Kosh M. J., Pedersen T. R., Mishin E., et al. // J. Geophys. Res. A. 2007. V. 112. Art. no A08304.
46. Fialer P. A. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 923.
47. Haslett J. C., Megill L. R. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 1005.
48. Milikh G. V., Demekhov A. G., Papadopoulos K., et al. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. Art. no L07803.
49. Frolov V. L., Sergeev E. N., Ermakova E. N., et al. // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28, No. 16. P. 3103.
50. Sergeev E. N., Frolov V. L., Grach S. M., Kotov P. V. // Adv. Space Res. 2006. V. 38. P. 2518.

Поступила в редакцию 27 мая 2013 г.; принята в печать 28 июня 2013 г.

STRUCTURE OF THE ELECTRIC FIELD OF A HIGH-POWER HF RADIO WAVE IN THE OUTER EARTH'S IONOSPHERE

V. L. Frolov, N. A. Mityakov, E. A. Shorokhova, and M. Parrot

The electric field of a high-power HF radio wave radiated by the SURA facility was measured using onboard instruments of the French microsatellite DEMETER at altitudes of 670 km. The data analysis shows that the high-power radio wave passes to the outer ionosphere under conditions where the difference between the cutoff frequency and pump-wave frequency does not exceed 0.5–0.7 MHz in the unperturbed ionosphere. Energy and spatial characteristics of the high-power radio wave transmitted through the ionosphere are determined. A possible mechanism explaining such a penetration to the supercritical plasma is discussed.