

УДК 533.95+550.348

## ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ, СТИМУЛИРОВАННЫЕ МОДИФИКАЦИЕЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КОРОТКИМИ РАДИОВОЛНАМИ

В. Л. Фролов<sup>1,2\*</sup>, А. Д. Акчурина<sup>2</sup>, И. А. Болотин<sup>1</sup>, А. О. Рябов<sup>1</sup>, Ж.-Ж. Бертьелье<sup>3</sup>,  
М. Парро<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

<sup>3</sup> CETP/IPSL, Saint-Maur;

<sup>4</sup> LPSE/CNRS, Orleans, France

На основе результатов экспериментов, выполненных по программе «Сура»—DEMETER в 2005–2010 годах, проанализированы свойства высыпаний энергичных электронов (с энергиями  $E \approx \approx 100$  кэВ) из радиационного пояса Земли при модификации  $F_2$ -области ионосферы мощными короткими радиоволнами с О-поляризацией в режиме их непрерывного излучения. Высыпания детектировались с использованием аппаратуры французского спутника DEMETER. Определены условия, при которых наблюдались высыпания. Установлено, что область высыпаний вытянута вдоль геомагнитного меридиана на расстояние до 1300 км; размеры области в поперечном направлении составляют около 400 км. Как показали ионозондовые измерения, такие высыпания приводят к усилению поглощения радиоволн в нижней ионосфере. Предполагается, что механизм стимуляции высыпаний электронов из радиационного пояса Земли определяется взаимодействием энергичных электронов с очень низкочастотными излучениями, которые генерируются при взаимодействии с плазмой немодулированной по амплитуде волны накачки с О-поляризацией вблизи высоты её отражения.

### ВВЕДЕНИЕ

Модификация  $F_2$ -области ионосферы мощными короткими радиоволнами с обыкновенной (О) поляризацией приводит к развитию в ней различных нелинейных явлений и плазменных неустойчивостей. Это вызывает генерацию вблизи высоты отражения мощной радиоволны высокочастотной (высокочастотные плазменные колебания и волны на частотах, близких к частоте волны накачки (ВН)) и низкочастотной (низкочастотные плазменные колебания и волны, а также возмущения концентрации и температуры плазмы) плазменной турбулентности. В результате, в этой области наблюдается сильный разогрев плазмы, ускорение электронов до сверхтепловых энергий, генерация электрических полей и токов, изменение формы профиля плазмы, модификация ионосферно-магнитосферных связей и другие явления.

За прошедшие почти 50 лет выполнения исследований по модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами были теоретически и экспериментально изучены основные свойства искусственных плазменных возмущений, включая их генерацию как в центральной части возмущённой области ионосферы, положение которой определяется диаграммой направленности излучения ВН и высотой её отражения, так и далеко за её пределами. Было установлено, что искусственные плазменные возмущения регистрируются на всём протяжении ионосферы по высоте и обнаруживаются на расстоянии до тысячи километров от стенда по горизонтали [1–6].

Первые результаты, прямо подтверждающие возможность стимуляции высыпаний энергичных электронов в среднеширотной ионосфере, были получены на стенде «Сура» во время эксперимента, выполненного 12 мая 2008 года, в котором было обнаружено, что формирование дакта

\* frolov@nirfi.unn.ru

на высотах внешней ионосферы ( $h \approx 660$  км) приводило внутри него к усилению в несколько раз потока энергичных электронов с энергиями  $E \approx 100$  кэВ. На основе этих результатов в работе [7] было сделано заключение, что наблюдающиеся высыпания электронов обусловлены управляемым возбуждением магнитосферного мазера путём формирования мощным радиоизлучением наземного коротковолнового передатчика искусственного волноводного канала — дакта с увеличенной плотностью плазмы [5, 8, 9]. Последующий анализ полученных за время миссии искусственного спутника Земли (ИСЗ) DEMETER всего объёма собранных экспериментальных данных показал присутствие высыпаний и во многих других случаях, что стимулировало более детальное изучение природы наблюдаемых здесь явлений.

Известно, что высыпания в атмосферу Земли энергичных электронов с энергиями  $E \leq 100$  кэВ должны вызывать её дополнительную ионизацию на высотах 70–130 км (на высотах D- и E-областей ионосферы) [6, 10]. В случае естественных событий, связанных с солнечной активностью, процесс дополнительной ионизации хорошо изучен. Он приводит к увеличению концентрации плазмы на высотах нижней ионосферы и к дополнительному (порой значительному) поглощению в ней радиоволн диапазона от сверхдлинных до коротких. В нагревных экспериментах существование такой искусственной ионизации было зарегистрировано в работе [11] с помощью харьковского радара некогерентного рассеяния, расположенного в 960 км к юго-западу от стенда «Сура». Было установлено, что наиболее сильное увеличение концентрации электронов над Харьковом, достигающее значений 60–70 %, наблюдалось на высотах около 100 км и отсутствовало на высотах около 140 км. Заметим, что по техническим причинам плазменные возмущения не могли быть зарегистрированы радаром на высотах ниже 90 км. Время запаздывания появления возмущений концентрации составляло около 10 мин, они продолжали наблюдаться ещё 10–20 мин после выключения волны накачки. Это явление объяснялось высыпаниями энергичных электронов с  $E \approx 100$  кэВ из радиационного пояса Земли, которые стимулировались работой стенда «Сура». Согласно сделанным в работе [11] оценкам плотность потока таких электронов должна составлять  $10^8 \div 10^{10}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Эти эксперименты прямо продемонстрировали, что область высыпаний энергичных электронов под воздействием излучения стенда «Сура» обнаруживается на значительных (порядка 1 000 км) расстояниях от него, намного превышающих размеры области ионосферы, засвеченной пучком мощных радиоволн. Согласно работе [12] такие высыпания регистрировались только в случаях, когда радиационный пояс Земли был заполнен энергичными электронами благодаря росту солнечной активности, и не регистрировались, если такая активность долгое время отсутствовала.

Эксперименты по стимуляции высыпаний энергичных электронов неоднократно проводились на стенде EISCAT-heater (Северная Норвегия) [13], который расположен в более северных, чем стенд «Сура», широтах, в областях с высоким уровнем естественной авроральной активности. Последнее обстоятельство, естественно, оказывает сильное влияние на процесс взаимодействия волны накачки с плазмой и определяет специфику существующих здесь ионосферно-магнитосферных связей.

Большой цикл исследований по стимулированию высыпаний высокоэнергичных электронов был выполнен в экспериментах на нагревном стенде HAARP (Аляска, США) [14], в которых для модификации ионосферы использовались модулированные по амплитуде мощные радиоволны с частотами модуляции от нескольких килогерц до 10–20 кГц, лежащими в области свистового (очень низкочастотного, ОНЧ) диапазона. Очень низкочастотные волны, генерируемые в ионосфере в результате нелинейной демодуляции мощной радиоволны, взаимодействуя с энергичными электронами радиационных поясов Земли, способны изменять питч-угловое распределение захваченных в них электронов, приводя к их высыпаниям в нижние слои атмосферы Земли.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по стимуляции

высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли при модификации среднеширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами с О-поляризацией, излучаемыми стендом «Сура». Эти исследования основаны на выполненных в 2005–2010 годах экспериментах по программе «Сура»—DEMETER. Отметим, что в представленных в работе [9] данных, касающихся свойств высыпаний энергичных электронов, принимались во внимание только сеансы, в которых регистрировалось формирование плазменных дактов. Сегодня ограниченность такого подхода очевидна.

## 1. ОРГАНИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

При проведении экспериментов по созданию искусственных плазменных возмущений в ионосфере Земли использовались мощные радиоволны с О-поляризацией, эффективно взаимодействующие с плазмой  $F_2$ -области ионосферы [3–5]. Стенд «Сура», описание которого приведено в работе [15], как правило, включался на 15 мин за 13 мин до пролёта ИСЗ через возмущённую магнитную силовую трубку, опирающуюся на область с сильно развитой турбулентностью, которая формируется вблизи высоты отражения волны накачки. При благоприятных ионосферных условиях такая длительность нагрева является достаточной для развития плазменных возмущений до практически стационарного уровня не только в области отражения волны накачки, но и на высотах внешней ионосферы [3, 9]. В большинстве случаев использовался наклон диаграммы направленности излучающей антенны стенда на  $12^\circ$  на юг, чтобы увеличить эффективность генерации искусственной турбулентности за счёт эффекта «магнитного зенита» [4, 5]. Всего по программе «Сура»—DEMETER в 2005–2010 годах было выполнено около 100 сеансов нагрева ионосферной плазмы с целью модификации её  $F_2$ -области. Измерения проводились в основном с марта по сентябрь в спокойных или очень спокойных геомагнитных условиях в годы затянувшегося минимума солнечной активности. Спутниковой аппаратурой не было зарегистрировано каких-либо заметных искусственных плазменных возмущений при работе стенда в дневные часы, что связано с сильным поглощением мощных радиоволн в нижней ионосфере, с формированием дефокусирующей линзы на высотах  $130\div 180$  км [16] и с низкой (не выше 200 км) высотой отражения ВН, а также в случае, когда частота мощной радиоволны превышала критическую частоту  $f_{0F_2}$  слоя  $F_2$  ионосферы (нагрев «на просвет») или когда орбита ИСЗ проходила на расстоянии больше 100 км от центра возмущённой магнитной силовой трубки [9].

Стенд «Сура» (НИРФИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия; координаты стенда:  $56,15^\circ$  с. ш.,  $46,1^\circ$  в. д., параметр Мак-Илвайна  $L \approx 2,6$ ) расположен в 120 км к востоку от Нижнего Новгорода [15]. В диапазоне наиболее часто используемых в измерениях частот ВН максимальная эффективная мощность излучения стенда в режиме синхронной работы всех трёх его модулей составляет около 80 МВт на частоте ВН  $f_0 \approx 4\,300$  кГц, увеличиваясь с ростом  $f_0$  примерно до 180 МВт на частоте  $f_0 \approx 6\,800$  кГц. Оболочка с  $L \approx 2,6$  попадает в зазор между внутренним и внешним радиационными поясами Земли. Поэтому свойства высыпаний энергичных электронов на широте стенда «Сура» сильно зависят от уровня солнечной активности, с ростом которой происходит заполнение зазора между поясами энергичными электронами.

Французский ИСЗ DEMETER был запущен в 2004 году на круговую солнце-синхронную полярную орбиту с наклоном  $98,3^\circ$  и высотой около 660 км. Над стендом «Сура» спутник пролетал в 18:00–18:30 UT в поздние вечерние (предполуночные) часы и около 07:30–08:00 UT в дневных условиях. Он был оснащён широким набором различных инструментов и практически идеально подходил для детектирования плазменных возмущений, возбуждаемых в ионосфере при её модификации мощными короткими радиоволнами. Детектирование энергичных электронов осуществлялось с помощью спектрометра IDP, который в режиме «burst mode» ежедневно проводил измерения энергии и потока энергичных электронов в диапазоне от 70 кэВ до

2,5 МэВ [17]. Особенностью размещения этого прибора на корпусе ИСЗ являлось то, что он измерял потоки электронов, ориентированные близко к ортогональному относительно плоскости его орбиты направлению (с питч-углами, лежащими в области  $90^\circ \pm 16^\circ$  по отношению к направлению геомагнитного поля, что соответствовало регистрации запертых в магнитной силовой трубке электронов) и не регистрировал электроны, которые двигались в направлении, близком к направлению геомагнитного поля. Однако из-за низкой высоты ИСЗ (около 660 км) значение питч-углов для таких электронов в экваториальной области возмущённой магнитной силовой трубки лишь незначительно (на несколько градусов) превышало угол конуса потерь, что обеспечивало условия перевода в конус потерь большинства таких частиц при их взаимодействии с ОНЧ волнами.

Работа с полученными экспериментальными данными включала в себя:

1) определение в различных геофизических условиях пространственных и спектральных характеристик естественных высыпаний энергичных электронов, когда стенд «Сура» не работал, с целью выработки критериев обнаружения на их фоне высыпаний искусственного характера;

2) определение свойств искусственных высыпаний энергичных электронов в присутствии индуцированных модификацией ионосферы плазменных дактов;

3) определение свойств искусственных высыпаний, когда в силу различных причин аппаратурой ИСЗ дакты не регистрировались.

Для всех рассматриваемых в работе сеансов измерений в табл. 1 приведены сведения об условиях их проведения. В её второй столбец включены: время  $T^*$ , когда расстояние между орбитой ИСЗ и центром возмущённой магнитной силовой трубки было минимальным и равным  $D^*$ , интервал времени излучения стенда «Сура»  $T_{\text{pump}}$ , частота и мощность волны накачки и угол наклона диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн. Информация об ионосферных условиях, высоте  $h_{\text{ref}}$  отражения волны накачки, наличии генерации искусственного  $F$ -рассеяния ( $F_{\text{spread}}$ ), регистрации дакта с повышенной концентрацией плазмы на величину  $\delta N$ , присутствии спорадического слоя  $E$  на ионограммах включена в третий столбец таблицы. Для характеристики уровня геомагнитной активности во время проведения измерений в таблице в её третьем столбце приводятся значения индексов  $\Sigma K_p$  ( $K_p$  — планетарный трёхчасовой индекс магнитной активности,  $\Sigma K_p$  — его суммарное суточное значение) и АЕ (АЕ — индекс авроральной электроструи); здесь же указано, сколько времени прошло с начала последних геомагнитных возмущений до рассматриваемого сеанса измерений, что может характеризовать степень наполнения радиационного пояса Земли, включая и оболочку с  $L \approx 2,6$ , энергичными электронами. Сразу отметим, что во время проведения анализируемых в работе измерений наблюдались только слабые магнитные бури (индекс силы магнитной бури  $G$  не превышал 2). В работе нами использовалось всемирное время UT, которое для периода проведения измерений было связано с московским летним временем MSK как  $UT = MSK - 4$  ч.

## 2. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

### 2.1. Регистрация высыпаний энергичных электронов в естественных условиях

Для анализа свойств высыпаний, наблюдающихся в естественных условиях, дополнительно к приведённым в табл. 1 были выбраны сеансы измерений, выполненные в мае, августе и сентябре 2005 и 2006 годов, в мае и июне 2008 года, а также отдельные сеансы измерений в 2010 году, когда ИСЗ DEMETER пролетал над стендом «Сура», который не работал либо по техническим причинам, либо из-за низких критических частот, либо из-за слишком большого расстояния  $D^*$  между орбитой спутника и центром возмущённой нагретой магнитной силовой трубки. Для получения необходимой информации использовались результаты измерений, полученные с установленных

Таблица 1

№	Дата. Время $T^*$ (УТ), время нагрева $T_{\text{rump}}$ , расстояние $D^*$ . Частота ВН $f_0$ , мощность ВН, наклон диаграммы направленности	$f_{0F_2}$ , $h'_{\text{ref}}$ , $\Sigma K_p$ , АЕ. Дата последнего сильного геомагнитного возмущения, максимальное значение $K_p$ для него. Генерация $F_{\text{spread}}$ при нагреве. Регистрация дакта
1	30.04.2005 $T^* = 18:25:36$ , $T_{\text{rump}} = 18:15 \div 18:30$ , $D^* = 26$ км. 4 600 кГц, 100 МВт, $12^\circ$ на юг	5,2 МГц, 287 км, $\Sigma K_p = 30^-$ , АЕ = 400 нТл. Возмущения 29.04 с $K_p = 4$ . Генерация очень сильного $F_{\text{spread}}$ . Дакт с $\delta N = 33\%$
2	25.05.2005 $T^* = 18:19:54$ , $T_{\text{rump}} = 18:09 \div 18:34$ , $D^* = 67$ км. 5 828 кГц, 150 МВт, $0^\circ$	6,6 МГц, 246 км, $\Sigma K_p = 7$ , АЕ $\leq 25$ нТл. Возмущения 20.05 с $K_p = 5$ . Генерация небольшого $F_{\text{spread}}$ . Дакт не регистрируется
3	22.08.2005 $T^* = 18:14:07$ , $T_{\text{rump}} = 18:11 \div 18:19$ (до этого с 15:00 в режиме [5 мин — вкл, 10 мин — выкл]), $D^* = 200$ км. 4 300 кГц, 50 МВт, $12^\circ$ на юг	5,3 МГц, 245 км, $\Sigma K_p = 17$ , АЕ $\approx 50$ нТл. Возмущения 16.08 с $K_p = 4$ . Генерация сильного $F_{\text{spread}}$ . Дакт не регистрируется
4	17.05.2006 $T^* = 18:28:34$ , $T_{\text{rump}} = 18:18 \div 18:33$ , $D^* = 39$ км. 4 785 кГц, 120 МВт, $12^\circ$ на юг	5,9 МГц, 220 км, $\Sigma K_p = 10$ , АЕ = 320 нТл. Возмущения 11.05 с $K_p = 4$ . Генерация сильного $F_{\text{spread}}$ . Дакт с $\delta N = 27\%$
5	20.05.2006 $T^* = 18:22:31$ , $T_{\text{rump}} = 18:12 \div 18:27$ , $D^* = 68$ км. 5 455 кГц, 150 МВт, $12^\circ$ на юг	5,7 МГц, 225 км, $\Sigma K_p = 12^-$ , АЕ = 70 нТл. Возмущения 18.05 с $K_p = 4$ . — (нет ионограмм). Дакт не регистрируется
6	24.08.2006 $T^* = 18:22:26$ , $T_{\text{rump}} = 18:12 \div 18:27$ , $D^* = 55$ км. 4 300 кГц, 80 МВт, $12^\circ$ на юг	4,5 МГц, 245 км, $\Sigma K_p = 9$ , АЕ $\leq 230$ нТл. Возмущения 19.08 с $K_p = 6$ . Генерация сильного $F_{\text{spread}}$ . Дакт не регистрируется
7	05.04.2007 $T^* = 18:22:30$ , $T_{\text{rump}} = 18:12 \div 18:27$ , $D^* = 43$ км. 5 480 кГц, 150 МВт, $12^\circ$ на юг	5,5 МГц, —, $\Sigma K_p = 7$ , АЕ = 100 нТл. Возмущения 01.04 с $K_p = 4$ . — (нет ионограмм). Дакт не регистрируется
8	07.05.2007 $T^* = 18:22:38$ , $T_{\text{rump}} = 18:16 \div 18:26$ , $D^* = 34$ км. 4 785 кГц, 120 МВт, $12^\circ$ на юг	$\leq 4,8$ МГц, 270 км, $\Sigma K_p = 21^+$ , АЕ = 270 нТл. Возмущения 28.04 с $K_p = 4$ . Генерация сильного $F_{\text{spread}}$ . Дакт не регистрируется
9	24.08.2007 $T^* = 18:29:42$ , $T_{\text{rump}} = 18:19 \div 18:34$ , $D^* = 125$ км. 4 300 кГц, 80 МВт, $12^\circ$ на юг	4,7 МГц, 240 км, $\Sigma K_p = 2$ , АЕ = 35 нТл. Возмущения 07.08 с $K_p = 4$ . Генерация сильного $F_{\text{spread}}$ . Дакт не регистрируется
10	30.08.2007 $T^* = 18:17:41$ , $T_{\text{rump}} = 18:13 \div 18:28$ , $D^* = 64$ км. 4 300 кГц, 80 МВт, $12^\circ$ на юг	4,3 МГц, —, $\Sigma K_p = 7$ , АЕ $\leq 35$ нТл. Возмущения 07.08 с $K_p = 4$ . — (нет ионограмм). Дакт не регистрируется
11	12.05.2008 $T^* = 18:16:28$ , $T_{\text{rump}} = 18:05 \div 18:20$ , $D^* = 21$ км. 4 300 кГц, 80 МВт, $12^\circ$ на юг	5,0 МГц, 220 км, $\Sigma K_p = 6^-$ , АЕ $\leq 35$ нТл. Возмущения 23.04 с $K_p = 4$ . Генерация сильного $F_{\text{spread}}$ . $\delta N = 32\%$
12	28.05.2008 $T^* = 18:16:28$ , $T_{\text{rump}} = 18:00 \div 18:21$ , $D^* = 40$ км. 4 300 кГц, 80 МВт, $12^\circ$ на юг	4,7 МГц, 240 км, $\Sigma K_p = 19$ , АЕ $\approx 170$ нТл. Возмущения 23.04 с $K_p = 4$ . Очень сильный $F_{\text{spread}}$ . Дакт с $\delta N = 14\%$

13	27.08.2009 $T^* = 18:03:47$ , $T_{\text{pump}} = 17:53 \div 18:08$ , $D^* = 39$ км. 4300 кГц, 40 МВт, $0^\circ$	4,6 $\rightarrow$ 4,2 МГц, 240 км, $\Sigma K_p = 19$ , АЕ $\approx$ 300 нТл. Весь август спокойно. Генерация сильного $F_{\text{spreload}}$ . Дакт с $\delta N = 20\%$
14	18.04.2010 $T^* = 17:54:03$ , $T_{\text{pump}} = 17:15 \div 17:55$ , $D^* = 25$ км. 4300 кГц, 40 МВт, $12^\circ$ на юг	4,7 МГц, 290 км, $\Sigma K_p = 5^-$ , АЕ $\leq$ 35 нТл. Возмущения 05.04 с $K_p = 5$ . Генерация сильного $F_{\text{spreload}}$ . Два дакта с $\delta N = 24\%$ и $4\%$
15	28.04.2010 $T^* = 18:01:13$ , $T_{\text{pump}} = 17:15 \div 17:55$ , $D^* = 105$ км. 4300 кГц, 50 МВт, $12^\circ$ на юг	5,7 МГц, 225 км, $\Sigma K_p = 6^+$ , АЕ $\leq$ 35 нТл. Возмущения 05.04 с $K_p = 5$ . Генерация среднего $F_{\text{spreload}}$ . Дакт не регистрируется
16	14.05.2010 $T^* = 17:53:13$ , $T_{\text{pump}} = 17:40 \div 17:53$ , $D^* = 28$ км. 4785 кГц, 90 МВт, $12^\circ$ на юг	6,2 МГц, 235 км, $\Sigma K_p = 5^-$ , АЕ $\leq$ 35 нТл. Возмущения 02.05 с $K_p = 6$ . Генерация слабого $F_{\text{spreload}}$ . $\delta N = 14\%$
17	27.05.2010 $T^* = 17:52:42$ , $T_{\text{pump}} = 17:35 \div 17:50$ , $D^* = 27$ км. 4785 кГц, 70 МВт, $12^\circ$ на юг	5,3 МГц, 250 км, $\Sigma K_p = 4$ , АЕ $\leq$ 35 нТл. Возмущения 02.05 с $K_p = 6$ . Генерация сильного $F_{\text{spreload}}$ . Дакт с $\delta N = 10\%$
18	19.06.2010 $T^* = 17:58:56$ , $T_{\text{pump}} = 17:39 \div 17:59$ , $D^* = 95$ км. 4300 кГц, 40 МВт, $12^\circ$ на юг	5,1 МГц, 250 км, $\Sigma K_p = 5^+$ , АЕ $\leq$ 35 нТл. Возмущения 29.05 с $K_p = 4$ . Генерация сильного $F_{\text{spreload}}$ . $E_{\text{spor}}$ от 2,0 до 5,5 МГц, непрозрачный до 4,0 МГц. Дакт не регистрируется
19	22.06.2010 $T^* = 17:51:15$ , $T_{\text{pump}} = 17:31 \div 17:51$ , $D^* = 37$ км. 4785 кГц, 40 МВт, $12^\circ$ на юг (нагрев в режиме меандр с $F = 14,54$ кГц)	5,6 МГц, 245 км, $\Sigma K_p = 9$ , АЕ $\approx$ 80 нТл (конец 4-часовой возмущённости с АЕ до 250). Возмущения 29.05 с $K_p = 4$ . Генерация сильного $F_{\text{spreload}}$ . $E_{\text{spor}}$ от 2,0 до 5,5 МГц, непрозрачный до 4,0 МГц. Дакт не регистрируется.
20	18.09.2010 $T^* = 17:51:44$ , $T_{\text{pump}} = 16:20 \div 17:52$ , $D^* = 27$ км. 4300 кГц, 50 МВт, $12^\circ$ на юг	3,7 $\div$ 3,9 МГц, 235 км, $\Sigma K_p = 8^+$ , АЕ $\approx$ 150 нТл. Возмущения 24.08 с $K_p = 4$ . Нет $F_{\text{spreload}}$ на ионограммах. Дакт с $\delta N = 10\%$
21	21.09.2010 $T^* = 17:43:59$ , $T_{\text{pump}} = 17:19 \div 17:45$ , $D^* = 105$ км. 4740 кГц, 105 МВт, $12^\circ$ на юг	5,2 МГц, 225 км, $\Sigma K_p = 8$ , АЕ $\leq$ 35 нТл. Возмущения 24.08 с $K_p = 4$ . Генерация очень сильного $F_{\text{spreload}}$ . Дакт не регистрируется

на спутнике IDP-спектрометра и ленгмюровского зонда.

В процессе обработки экспериментальных данных анализировались: а) широта южной границы области сильных авроральных высыпаний на долготе стенда «Сура»; б) широта южного края области, где ещё регистрировались потоки электронов, хотя уже и слабой интенсивности (будем относить эту часть высыпаний к их среднеширотной низкоинтенсивной компоненте); в) связь характеристик высыпаний с индексами геомагнитной активности  $K_p$  (или его суточным значением  $\Sigma K_p$ ) и АЕ, а также с фазой развития геомагнитной возмущённости. Результаты такого анализа были использованы для выработки критериев, которые позволяют выделять высыпания энергичных электронов, стимулированные модификацией ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура», на фоне их естественной составляющей.

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы.

1) Во время авроральной активности невысокого уровня (с  $K_p \leq 2$  в течение нескольких предшествующих измерениям дней; при этом в день измерений индекс АЕ не превышал значений  $100 \div 200$  нТл) южная граница интенсивных высыпаний на долготе стенда «Сура» для времени

$T \approx 18 : 00$  UT не опускается ниже географической широты  $62 \div 65^\circ$  с. ш. Южнее этой области высыпания либо вообще отсутствовали, либо они имели низкую интенсивность с энергией электронов в них  $E \approx 100$  кэВ при их потоке  $F \leq 10$  с $^{-1}$  см $^{-2}$  ср $^{-1}$  кэВ $^{-1}$  (далее будем записывать величину потока сокращённо как  $F \leq 10$ , опуская её размерность). Таким образом, широта границы с сильными естественными высыпаниями при невысоком уровне авроральной активности находится почти на  $10^\circ$  севернее широты центра возмущённой нагревом ионосферы магнитной силовой трубки на высоте орбиты ИСЗ (660 км), равной  $\Phi_{\text{mft}}^* = 54,6^\circ$  с. ш. для используемого в большинстве измерений наклона диаграммы направленности антенны стенда на угол  $12^\circ$  на юг и высоты отражения ВН  $h_{\text{ref}} \approx 230 \div 250$  км.

2) С ростом значений индекса АЕ южная граница области с сильными естественными высыпаниями смещается на более южные широты, и при АЕ  $\approx 300 \div 800$  нТл она уже может достигать широты  $\Phi_{\text{mft}}^* \approx 54,6^\circ$  с. ш., опускаясь до широт  $46^\circ \div 52^\circ$  с. ш. для АЕ =  $800 \div 1\,200$  нТл. Отмечается, что скорость убывания широты  $\Phi_{\text{mft}}^*$  от величины АЕ может достаточно сильно изменяться от цикла к циклу измерений. При этом положение южной границы зоны высыпаний в большей степени контролируется средним значением индекса АЕ, измеренным в течение нескольких часов до проведения экспериментов, а не его текущим значением прямо во время измерений, когда ИСЗ DEMETER пересекал возмущённую магнитную силовую трубку.

3) Индекс АЕ имеет максимальные значения на стадии затухания геомагнитных возмущений, через 1–2 дня после регистрации максимальных значений индекса  $K_p$ , относящихся к фазе их развития. Этот вывод соответствует результатам других исследований.

4) Результаты измерений показали, что слабые высыпания электронов южнее границы зоны сильной авроральной активности (обозначим её как область «низкоширотной» компоненты естественных высыпаний), если они здесь регистрируются, занимают обычно для АЕ  $\leq 500$  нТл полосу широт  $\Phi = 50^\circ \div 62^\circ$  с. ш. вне зависимости от величины АЕ. Эта компонента высыпаний для энергий электронов  $E \approx 100 \div 150$  кэВ характеризуется потоками  $F \leq 10$ , причём величина  $F$  для неё, как правило, лишь слабо зависит от широты. В отдельных случаях такие высыпания наблюдались как локальные структуры, имеющие протяжённость  $3^\circ \div 5^\circ$  в полосе широт  $46^\circ \div 54^\circ$  с. ш. Из сказанного выше ясно, что «низкоширотная» компонента слабых высыпаний может обнаруживаться на широте стенда «Сура» даже при низком уровне геомагнитной активности. Однако если в течение предыдущих 10–15 дней и больше геомагнитных возмущений не было, то высыпания энергичных электронов здесь, как правило, не регистрировались. Представленные данные демонстрируют, как происходит заполнение энергичными электронами зазора между внутренним и внешним радиационными поясами Земли и его последующее опустошение. В качестве примера (см. рис. 1) рассмотрим характеристики высыпаний энергичных электронов, полученные в измерениях 6–27 мая 2006 года в условиях сильно изменяющегося день ото дня уровня геомагнитной активности, когда ИСЗ DEMETER пролетал над неработающим стендом «Сура». Здесь и ниже координата центра возмущённой магнитной силовой трубки на представленных панелях отмечена чёрным треугольником под осью абсцисс.

Геомагнитные возмущения с  $K_p$  до 5 начались 4 мая; 5, 6 и 7 мая они оставались на таком же высоком уровне. В течение 8 мая значение  $K_p$  уменьшилось с  $3^-$  до  $1^-$ ; 10 мая оно было уже в пределах  $0 \div 1$ . В этом цикле наиболее высокие значения индекса АЕ =  $300 \div 500$  нТл регистрировались 6 мая (см. рис. 1а), когда область интенсивных высыпаний доходила до широты  $54,6^\circ$  с. ш., но граница более слабых высыпаний была ещё на  $6^\circ$  южнее. Девятого мая (см. рис. 1б) на стадии релаксации геомагнитных возмущений значение индекса  $K_p$  уже упало до  $0 \div 1$ , а АЕ — до 50 нТл. Тем не менее аппаратурой спутника продолжали регистрироваться отдельные всплески слабых высыпаний на широте  $\Phi_{\text{mft}}^*$ .

С 10 на 11 мая был зарегистрирован новый всплеск геомагнитной активности с  $K_p$  до 4 и

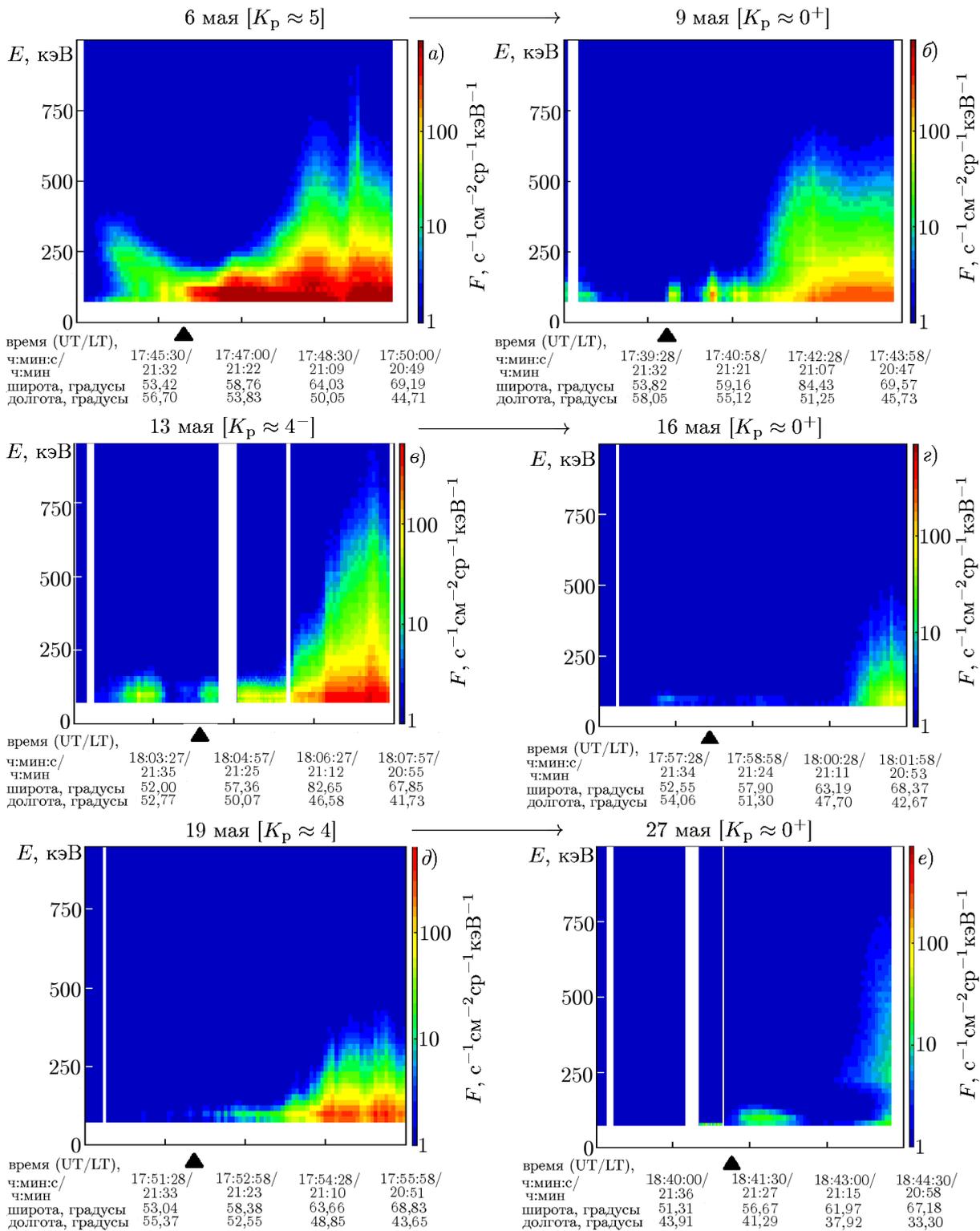


Рис. 1. Спектральные и пространственные характеристики естественных высыпаний энергичных электронов, измеренные 6–27 мая 2006 года в условиях сильно изменяющегося день ото дня уровня геомагнитной активности, когда ИСЗ DEMETER пролетал над неработающим стендом «Сура». Здесь и далее координаты центра возмущённой магнитной силовой трубки отмечены чёрным треугольником под ось абсцисс

$AE \approx 300 \div 500$  нТл; к 15 мая индекс  $K_p$  уменьшился до  $1^-$ ,  $AE$  — до 50 нТл. Тринадцатого мая (см. рис. 1б) опять наблюдались интенсивные авроральные высыпания, однако на широте стенда «Сура» обнаруживалась лишь их «низкоширотная» компонента. Здесь также можно видеть дополнительную локальную область высыпаний на широтах  $49^\circ \div 52^\circ$  с. ш. К 16 мая (см. рис. 1з) ситуация стала спокойной, авроральная активность имела небольшую интенсивность; при этом на широте  $\Phi_{mft}^*$  регистрировались лишь очень слабые высыпания с максимумом их интенсивности на широте около  $51,5^\circ$  с. ш.

Восемнадцатого мая в третий раз в течение месяца наблюдался всплеск геомагнитной активности с  $K_p$  до 4. Измерения 19 мая (см. рис. 1д) проходили в условиях  $K_p \approx 2$ ,  $AE \approx 150$  нТл, когда, судя по значениям  $K_p$ , пик возмущений был уже пройден. Однако уровень авроральных высыпаний был высоким и его «низкоширотная» компонента опускалась до широты стенда «Сура». После 22 мая уровень возмущённости постепенно уменьшался, и к 27 мая (см. рис. 1е) значение  $K_p$  составляло  $0^+$  при  $AE \approx 50$  нТл. При этом авроральная активность была уже слабой и наблюдалась только на широтах севернее  $64^\circ$  с. ш. при наличии локального усиления высыпаний в области широт  $55^\circ \div 60^\circ$  с. ш., которая располагалась лишь немного севернее  $\Phi_{mft}^*$ .

Таким образом, приведённые выше результаты показывают, что в день измерений уровень естественных высыпаний энергичных электронов определяется в большей степени значением индекса  $AE$ , а не  $K_p$ , и что при достаточно сильных возмущениях с  $AE \geq 300 \div 500$  нТл высыпания с высокой интенсивностью могут регистрироваться вплоть до широты стенда «Сура». Часто в них выделяется «низкоширотная» компонента достаточно слабой интенсивности, южная граница которой может опускаться до широты стенда и даже несколько южнее её и которая не имеет сильной широтной зависимости потока высыпавшихся электронов. Похожие выводы по свойствам высыпаний энергичных электронов на средних широтах можно найти, например, в работах [18, 19], из которых также следует, что потоки частиц с энергиями  $20 \div 45$  кэВ могут в  $3 \div 5$  раз превышать потоки электронов с энергиями  $85 \div 120$  кэВ и, следовательно, вносить с собой в ионосферу приблизительно ту же энергию, что и более энергичные частицы.

## 2.2. Регистрация высыпаний энергичных электронов в условиях нагрева ионосферы мощными радиоволнами

Принимая во внимание результаты изучения свойств естественных высыпаний энергичных электронов, проведём анализ наблюдений, когда на стенде «Сура» выполнялись эксперименты по модификации  $F_2$ -области ионосферы. Имеющиеся экспериментальные данные для удобства их представления и анализа были разделены на четыре категории: 1) когда спутник пролетал близко к центру возмущённой магнитной силовой трубки, но искусственные высыпания не регистрировались; 2) когда они регистрировались одновременно вместе с плазменным дактом; 3) когда они регистрировались в отсутствие плазменного дакта; 4) когда спутник пролетал далеко ( $D^* \geq 100$  км) от центра возмущённой магнитной силовой трубки и плазменный дакт, даже если он и возбуждался, не мог быть зарегистрирован. Для всех рассматриваемых здесь сеансов измерений в табл. 1 приведены сведения о работе стенда «Сура» (второй столбец) и об условиях проведения измерений (третий столбец). В представленном ниже анализе эти данные не будут воспроизводиться.

### 2.2.1. Отсутствие искусственных высыпаний энергичных электронов, когда спутник пролетал близко к центру возмущённой магнитной силовой трубки

Среди всех полученных данных сначала выделим сеансы, когда при работе стенда «Сура» не регистрировались высыпания, которые без сомнения можно было бы отнести к искусственным.

Ниже представлена краткая характеристика каждого из этих сеансов.

1) В сеансе 05.04.2007 (№ 7 в табл. 1), который характеризуется низкими уровнями авроральной и геомагнитной активности и проводился спустя 4 дня после начала геомагнитных возмущений, естественные «низкоширотные» высыпания электронов с энергией  $E$  до 170 кэВ и практически неизменной максимальной величиной потока  $F \approx 80$  для  $E \approx 100$  кэВ наблюдались в диапазоне широт  $56,2^\circ \div 61,5^\circ$  с. ш. (см. рис. 2а); на более высоких широтах регистрировалась область с высокой авроральной активностью. Особенностью этого сеанса являлся нагрев ионосферной плазмы, когда  $f_0 \approx f_{0F_2}$ . В таких условиях не наблюдается возбуждение интенсивной искусственной ионосферной турбулентности и формирование плазменного дакта из-за высокого уровня просачивания энергии ВН во внешнюю ионосферу [9]. В этом сеансе и в некоторых сеансах ниже белые полосы на рисунках отвечают периодам, когда прибор IDP по техническим причинам не проводил регистрацию энергичных электронов.

2) Модификация ионосферы в сеансе 30.08.2007 (№ 10) выполнялась при  $f_0 \approx f_{0F_2}$  и только в течение короткого времени, 5 мин, до пролёта спутника. Такие характеристики сеанса нагрева, как и в предыдущем случае, не отвечают условиям возбуждения интенсивной искусственной турбулентности. Сеанс проводился спустя 23 дня после начала геомагнитных возмущений и характеризуется низким уровнем авроральной и геомагнитной активности. Естественные «низкоширотные» высыпания электронов с  $F \approx 10$  для  $E \approx 100$  кэВ наблюдались в диапазоне широт  $57,7^\circ \div 62^\circ$  с. ш. (в  $330 \div 820$  км к северу от  $\Phi_{\text{mft}}^*$ ) с максимумом их интенсивности на широтах  $59,5^\circ \div 60,8^\circ$  с. ш.

3) Особенностью сеанса 28.04.2010 (№ 15; см. рис. 2б), который проводился через 23 дня после начала геомагнитных возмущений и характеризуется низким уровнем геомагнитной активности, являлись нагрев при  $f_0$  на 1,4 МГц ниже  $f_{0F_2}$  (т. е. далеко от критической частоты) и не очень высокая, 50 МВт, мощность нагрева. Как показано в работе [9], при меньших мощностях ВН формирование дакта может уже не обнаруживаться. В рассматриваемом сеансе «низкоширотные» высыпания электронов с  $E \leq 140$  кэВ наблюдались только на широтах  $56,0^\circ \div 62,3^\circ$  с. ш. ( $150 \div 850$  км севернее  $\Phi_{\text{mft}}^*$ ) с максимумом потока  $F \approx 10$  для  $E \approx 100$  кэВ на широтах  $56,7^\circ \div 57,2^\circ$  с. ш. Немного южнее этой области регистрировались ещё два отдельных всплеска сильных высыпаний; севернее её энергия электронов и величина их потока постепенно уменьшались с приближением к  $62,7^\circ$  с. ш. (т. е. при приближении к области высокой авроральной активности). Из-за большого расстояния до центра возмущённой магнитной силовой трубки ( $D^* = 105$  км) и прекращения нагрева за 6 мин до пролёта ИСЗ его аппаратурой не могли быть зарегистрированы дакт и какие-либо иные плазменные возмущения. Однако нельзя исключить, что в этом сеансе усиление интенсивности высыпаний в области широт  $56,7^\circ \div 57,2^\circ$  с. ш. могло быть частично связано с работой стенда «Сура». Особенностью этого сеанса также является большое время между окончанием геомагнитной активности и измерениями, когда оболочка для  $L \approx 2,6$  уже могла потерять энергичные электроны.

4) Особенностью сеанса 19.06.2010 (№ 18), который проводился через 21 день после начала геомагнитных возмущений, являлись небольшая мощность излучения ВН (40 МВт), низкий уровень геомагнитной активности, а также присутствие во время модификации ионосферы полупрозрачного на частоте мощной радиоволны спорадического слоя  $E_{\text{spor}}$ , что могло приводить к значительному ослаблению транспортируемой в верхнюю ионосферу мощности ВН. В этом сеансе (см. рис. 2в) «низкоширотная» компонента высыпаний электронов с  $E \approx 100$  кэВ регистрировалась на широтах  $53,3^\circ \div 61,7^\circ$  с. ш. (от 140 км к югу до 820 км к северу от  $\Phi_{\text{mft}}^*$ ) с максимумом потока  $F \approx 20$  для  $E \approx 100$  кэВ на широтах  $56,3^\circ \div 57,7^\circ$  с. ш. Южнее и севернее области максимума интенсивности высыпаний и величины их потоков плавно уменьшаются, быстрее — в южном направлении. Имеет место небольшой максимум интенсивности высыпаний на широте  $\Phi_{\text{mft}}^* = 54,6^\circ$  с. ш.

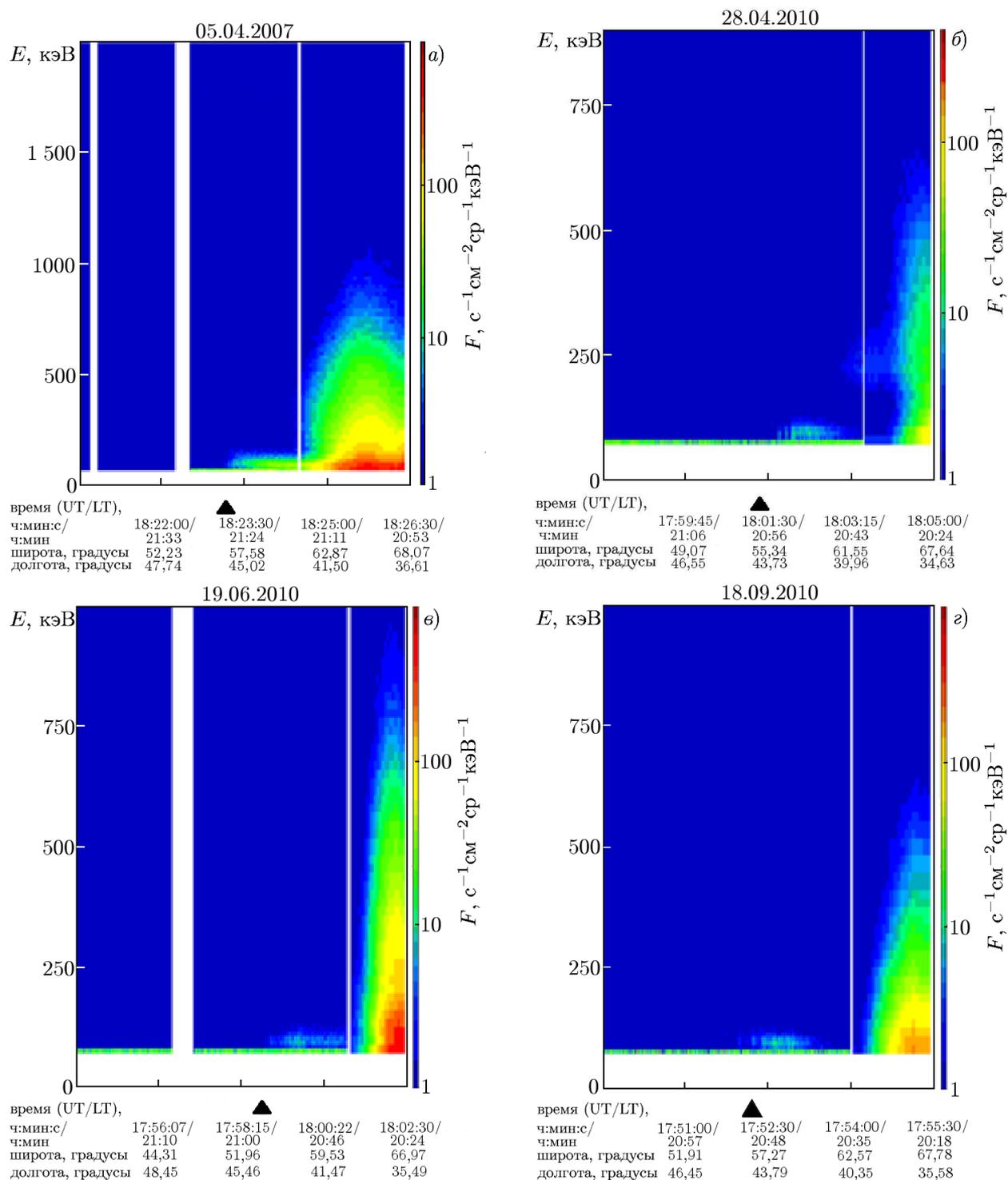


Рис. 2. Примеры сеансов, когда при работе стенда «Сура» не регистрировались высыпания, которые, безусловно, можно было бы отнести к искусственным (сеансы 7, 15, 18 и 20 на панелях а, б, в и г соответственно)

Большое расстояние до центра возмущённой магнитной силовой трубки ( $D^* = 95$  км), низкая мощность ВН и присутствие  $E_{\text{spor}}$  явились причиной отсутствия регистрации генерации дакта и

иных плазменных возмущений. Основываясь на имеющихся данных, основную часть высыпаний на широтах южнее зоны авроральной активности нельзя отнести к искусственным, хотя также нельзя исключить, что некоторое усиление потока энергичных электронов вблизи  $\Phi_{\text{mft}}^*$  может быть связано с работой стенда «Сура».

5) Сеанс 22.06.2010 (№ 19) проводился через 23 дня после начала геомагнитных возмущений в условиях низкого уровня геомагнитной активности. Его особенностью являлись небольшая мощность излучения ВН (40 МВт) и присутствие во время модификации ионосферы практически непрозрачного (экранирующего) слоя  $E_{\text{spor}}$ , что объясняет отсутствие генерации дакта и иных плазменных возмущений. По своим характеристикам он очень похож на сеанс № 18. В этом сеансе «низкоширотные» высыпания электронов с  $E \approx 120$  кэВ наблюдались на широтах  $54,3^\circ \div 61,7^\circ$  с. ш. (от 30 км к югу до 780 км к северу от  $\Phi_{\text{mft}}^*$ ) с выраженным максимумом потока  $F \approx 20$  для  $E \approx 100$  кэВ на широтах  $57,9^\circ \div 59,7^\circ$  с. ш.; южнее и севернее области максимума энергия электронов и величина их потоков постепенно уменьшаются (медленнее — к северу). Высыпания энергичных электронов с явными признаками их искусственного характера здесь не обнаруживались, хотя возможно, что усиление потока энергичных электронов вблизи  $\Phi_{\text{mft}}^*$  может быть связано с работой стенда.

6) Особенностью сеанса 18.09.2010 (№ 20; см. рис. 2з) являлись невысокая мощность излучения ВН (50 МВт), а также то, что во время пролёта ИСЗ над стендом частота ВН была уже выше критической частоты  $f_{0F_2}$ , хотя в начале нагрева, который был включён за 1,5 ч до пролёта,  $f_0$  была ниже  $f_{0F_2}$ , что обеспечивало условия создания плазменного дакта и возбуждения плазменной турбулентности на высотах внешней ионосферы. Высыпаний энергичных электронов с явными признаками их искусственного характера здесь зарегистрировано не было. В этом сеансе «низкоширотные» высыпания электронов с  $E \leq 120$  кэВ наблюдались на широтах  $55,4^\circ \div 61,2^\circ$  с. ш. (90 ÷ 730 км к северу от  $\Phi_{\text{mft}}^*$ ) с максимумом интенсивности высыпаний ( $F \approx 10$  для  $E \approx 100$  кэВ) на широтах  $57,2^\circ \div 58,6^\circ$  с.ш.; от этой области интенсивность высыпаний постепенно уменьшалась к северу и несколько быстрее к югу. Из анализа этого сеанса можно заключить, что само присутствие плазменного дакта не является достаточным условием для генерации искусственных высыпаний энергичных электронов, например по причине их отсутствия на оболочке с  $L \approx 2,6$ .

Завершая рассмотрение этого блока экспериментальных данных, ещё раз отметим, что большинство рассмотренных выше сеансов измерений проводилось спустя значительное время (больше 20 дней) после последних геомагнитных возмущений в условиях низкого уровня авроральной активности, когда значение индекса АЕ, за одним исключением, не превышало 100 нТл.

Представленные выше экспериментальные данные позволяют заключить, что стимулированные модификацией ионосферы искусственные высыпания энергичных электронов не регистрировались, когда не выполнялись условия генерации интенсивных плазменных возмущений вблизи высоты отражения ВН. Это относится к случаям нагрева «на просвет» или даже в условиях  $f_0 \approx \approx f_{0F_2}$ , для частоты ВН более чем на 1 МГц ниже  $f_{0F_2}$ , при низких мощностях ВН ( $P_{\text{eff}} \leq 40$  МВт), при коротких (несколько минут) временах нагрева, при наличии спорадического  $E$ -слоя, частично или полностью экранирующего  $F_2$ -область ионосферы. В таких же условиях не наблюдается генерация дактов с повышенной концентрацией плазмы на высотах внешней ионосферы [3, 9]. Искусственные высыпания также не регистрировались, когда геомагнитные условия перед измерениями оставались длительное время спокойными, что может быть связано с отсутствием энергичных электронов на оболочке  $L \approx 2,6$ , которая в спокойных геомагнитных условиях находится между внутренним и внешним радиационными поясами Земли. Тем не менее выполненные исследования показали, что в области широт  $56^\circ \div 59^\circ$  с. ш. иногда наблюдаются локальные (по широте) высыпания энергичных электронов, которые по части своих характеристик могут быть связаны с работой стенда «Сура».

### 2.2.2. Высыпания энергичных электронов при наличии дактов плотности плазмы

Эти сеансы интересны тем, что регистрируемые в них дакты с увеличенной концентрацией плазмы заведомо являются искусственными образованиями, создаваемыми при нагреве ионосферы мощными короткими радиоволнами [5, 9]. Из 9 сеансов, в которых наблюдалось формирование дакта, в 3 случаях имело место их явное влияние на интенсивность высыпаний энергичных электронов; в 3 сеансах это влияние наблюдалось, но имело не столь выраженную форму, либо на результаты этих измерений дополнительно оказывали влияние технические причины, ещё в 3 сеансах не было отмечено какого-либо заметного влияния дактов на характеристики высыпаний. Из последних трёх сеансов один (№ 20) был рассмотрен в предыдущем разделе.

Рассмотрим сначала сеансы, в которых влияние дакта как фактора стимуляции высыпания энергичных электронов было бесспорным.

1) В сеансе 12.05.2008 (№ 11; см. рис. 3а) высыпания энергичных электронов с  $E = 70 \div 150$  кэВ и  $F \approx 5 \div 70$  наблюдались в диапазоне широт  $50,5^\circ \div 60,2^\circ$  с. ш. (450 на юг и 620 км на север от  $\Phi_{\text{mft}}^*$ ), причём величина потока вдоль орбиты спутника уменьшалась с увеличением расстояния от ИСЗ до центра возмущённой магнитной силовой трубки. Максимум интенсивности высыпаний с  $F \approx 70$  для  $E \approx 100$  кэВ здесь регистрировался во время пересечения ИСЗ дакта концентрации плазмы, однако в 180 км южнее  $\Phi_{\text{mft}}^*$  наблюдалось локальное усиление интенсивности высыпаний. В этом сеансе имело место возбуждение сильных плазменных возмущений при низком уровне авроральной и геомагнитной активности, но при повышенной интегральной концентрации электронов в ионосфере. Измерения проводились через 19 дней после начала геомагнитных возмущений. Отметим, что результаты измерений именно в этом сеансе рассматривались в работе [7], в которой был сделан вывод, что наблюдаемые при излучении стенда «Сура» более интенсивные высыпания энергичных электронов внутри дакта определяются возбуждением магнитосферного мазера. На основе полученных данных сейчас стало ясно, что не только высыпания энергичных электронов внутри дакта имеют здесь искусственный характер, но и высыпания южнее и севернее дакта (всего на расстоянии 1070 км вдоль орбиты спутника, практически вдоль меридиана) тоже были стимулированы модификацией ионосферы мощными короткими радиоволнами.

2) Измерения в сеансе 14.05.2010 (№ 16) проводились через 12 дней после начала геомагнитных возмущений. Высыпания энергичных электронов с  $E = 70 \div 200$  кэВ и  $F \approx 5 \div 100$  (см. рис. 3б) наблюдались на широтах  $50,3^\circ \div 60,7^\circ$  с. ш. (на расстоянии от 480 км на юг и до 680 км на север от  $\Phi_{\text{mft}}^*$ ), при этом величина потока и энергия регистрируемых электронов уменьшались с увеличением расстояния от центра возмущённой магнитной силовой трубки. Локальный максимум интенсивности высыпаний с  $F \approx 80$  для  $E \approx 100$  кэВ здесь имел место во время пересечения ИСЗ плазменного дакта, который регистрировался несколько южнее  $\Phi_{\text{mft}}^*$ , что может быть связано с влиянием эффекта «магнитного зенита», когда область с наиболее сильными плазменными возмущениями оказывается смещённой на  $20 \div 30$  км от центра диаграммы направленности пучка мощных радиоволн по направлению к магнитному зениту [2, 3, 5]. Однако максимальные потоки  $F \approx 100$  электронов с  $E \approx 100$  кэВ наблюдались здесь в  $80 \div 200$  км севернее центра возмущённой магнитной силовой трубки. Последнее может быть связано с более высоким содержанием энергичных электронов на оболочках, расположенных ближе к внутренней границе внешнего радиационного пояса, по сравнению с их содержанием на оболочке  $L \approx 2,6$ . Отмечается, что интенсивность высыпаний падала к северу медленнее, чем к югу. Эти данные прямо свидетельствуют, что не только высыпания в дакте, но и высыпания южнее и севернее дакта на расстоянии 1160 км вдоль орбиты спутника тоже стимулированы нагревом ионосферы. Эти измерения проводились при низком уровне авроральной и геомагнитной активности спустя 12 дней после начала возмущений, когда в зазоре между радиационными поясами содержание энергичных электронов

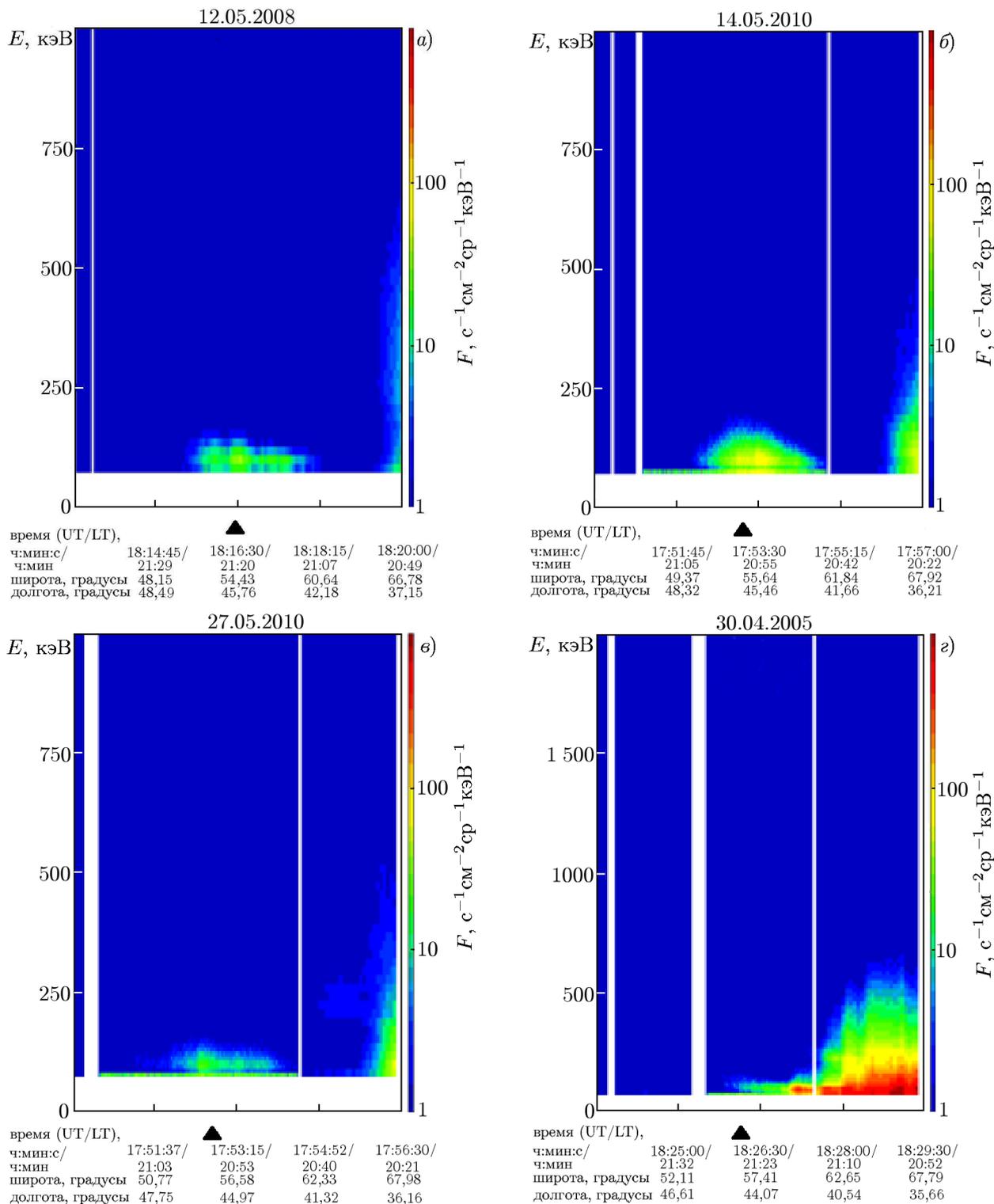


Рис. 3. Примеры сеансов, когда регистрировались искусственные высывания и дакты с увеличенной концентрацией плазмы (сеансы 11, 16, 17 и 1 на панелях а, б, в и z) соответственно

уже заметно уменьшается. Как было установлено в работе [9], в этом сеансе наблюдалось возбуждение сильных плазменных возмущений во внешней ионосфере, что свидетельствует о высокой

эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой.

3) Измерения в сеансе 27.05.2010 (№ 17) проводились через 25 дней после начала геомагнитных возмущений при низком уровне авроральной и геомагнитной активности. Искусственные высыпания энергичных электронов с  $E = 70 \div 150$  кэВ и  $F \approx 5 \div 70$  (см. рис. 3б) наблюдались на широтах  $49,5^\circ \div 61,0^\circ$  с. ш. (на расстоянии от 570 на юг и до 710 км на север от  $\Phi_{\text{mft}}^*$ ); величина потока и энергия регистрируемых электронов уменьшались с увеличением расстояния, быстрее к югу, чем к северу. Максимум интенсивности высыпаний с  $F \approx 40$  для  $E \approx 100$  кэВ имел место во время пересечения ИСЗ плазменного дакта и немного южнее его, сам дакт располагался в 30 км южнее относительно расчётного значения широты центра трубки  $\Phi_{\text{mft}}^*$ , что связывается с влиянием эффекта «магнитного зенита». Как и в предыдущем сеансе, здесь имело место возбуждение сильных плазменных возмущений.

4) В течение сеансов 17.05.2006 (№ 4) и 28.05.2008 (№ 12) во время прохождения ИСЗ через плазменный дакт спектрометр IDP выключался на время около 23 с, и только на краю этой полосы можно видеть увеличенный уровень интенсивности высыпаний энергичных электронов с  $E \approx 100$  кэВ с уменьшением интенсивности высыпаний дальше к северу. Можно считать, что и эти сеансы подтверждают наличие влияния индуцированных ВН дактов с увеличенной концентрацией плазмы на свойства высыпаний энергичных электронов.

Отдельно рассмотрим сеанс измерений 30.04.2005 (сеанс № 1; см. рис. 3з). Измерения в этом сеансе проводились через сутки после начала геомагнитных возмущений в условиях повышенной авроральной и геомагнитной активности. Из измерений характеристик энергичных электронов видно, что к югу от зоны авроральной активности (южнее  $59^\circ$  с. ш.) можно выделить две компоненты высыпаний: одна характеризуется более высокой интенсивностью потока и слабой зависимостью энергии электронов  $E$  от широты; вторая компонента, с низким потоком,  $F \leq 10$ , имеет диффузный характер; для неё характерно постепенное увеличение энергии электронов к югу (с приближением к  $\Phi_{\text{mft}}^*$ ) и резкий обрыв спектра на широте  $54,5^\circ$  с. ш., приблизительно в 100 км севернее  $\Phi_{\text{mft}}^*$ . Первую компоненту высыпаний можно отнести к «низкоширотной» компоненте естественных высыпаний, в то время как вторая компонента имеет явные признаки искусственного их происхождения. При этом следует заключить, что одного дня с начала геомагнитных возмущений недостаточно, чтобы произошло заполнение энергичными электронами зазора между радиационными поясами.

Завершая рассмотрение результатов, относящихся к данному разделу работы, отметим, что высыпания не регистрировались 27.08.2009 (сеанс № 13) и 18.04.2010 (сеанс № 14), когда условия стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли были благоприятными. Их отсутствие, как и в работе [12], можно связать с тем, что нагрев ионосферы проводился, когда длительное время перед измерениями были спокойные геомагнитные условия и поэтому на оболочке  $L \approx 2,6$  отсутствовали электроны с энергиями  $E \geq 70$  кэВ. Присутствие энергичных электронов в зазоре между радиационными поясами Земли является важным условием для стимуляции их высыпаний при модификации среднеширотного  $F_2$ -слоя ионосферы мощным радиоизлучением станда «Сура».

Результаты выполненных измерений позволяют сформулировать признаки искусственного характера высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли, наблюдавшихся в экспериментах «Сура»—DEMETER при модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами в поздние вечерние и предполуденные часы:

1) как правило, максимум интенсивности высыпаний наблюдается внутри возмущённой магнитной силовой трубки (особенно при формировании в ней дакта с увеличенной концентрацией плазмы);

2) в плоскости геомагнитного меридиана интенсивность высыпаний плавно уменьшается в на-

правлении к северу от центра возмущённой магнитной силовой трубки, простираясь до области авроральных широт, и значительно более резко к югу от него;

3) энергия высыпающихся электронов с их максимальными потоками до  $F \approx 100$  составляет около 100 кэВ по измерениям в области  $E \geq 70$  кэВ;

4) высыпания наблюдаются, когда транспортируемая в верхнюю ионосферу эффективная мощность излучения ВН превышает 40 МВт и при этом имеет место эффективное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой  $F_2$ -слоя, которое проявляется как генерация сильного  $F$ -рассеяния (или  $F_{\text{spread}}$ ) на ионограммах вертикального зондирования и как аномальное ослабление радиоволн с О-поляризацией на частотах около и выше частоты ВН.

### 2.2.3. Высыпания в отсутствие регистрации дактов плотности плазмы

В этом разделе работы рассматриваются результаты измерений, полученные в сеансах, когда дакт не регистрировался, плазменные возмущения были слабы или отсутствовали, однако наблюдалось появление высыпаний энергичных электронов, индуцированных нагревом ионосферы мощными короткими радиоволнами.

1) Измерения в сеансе 25.05.2005 (№ 2; см. рис. 4а) проводились через 25 дней после начала геомагнитных возмущений. Его особенностью являлось то, что он проводился при высокой критической частоте,  $f_{0F_2} \approx 6,6$  МГц, с вертикальной диаграммой направленности антенны стелды, но с высокой эффективной мощностью излучения ВН,  $P_{\text{eff}} \approx 150$  МВт. При этом возбуждалось только слабое  $F$ -рассеяние (на ионограммах регистрировался слабый  $F_{\text{spread}}$ ). Невысокий регистрируемый уровень плазменных возмущений в этом сеансе можно связать с высокими критическими частотами, вертикальной диаграммой направленности излучения мощной радиоволны и достаточно большим расстоянием  $D^* = 67$  км между орбитой ИСЗ и центром возмущённой магнитной силовой трубки. Дакт не обнаруживался аппаратурой спутника, что может быть связано как с большим расстоянием  $D^*$ , так и с малой эффективностью взаимодействия ВН с плазмой. Несмотря на далеко неоптимальные условия модификации  $F_2$ -области, в этом сеансе регистрировались интенсивные высыпания с максимальной интенсивностью на широте  $\Phi_{\text{mft}}^*$ . Требуется проведение дальнейших исследований, чтобы понять, с чем это может быть связано. Полученные здесь результаты позволяют заключить, что поперечный размер зоны высыпаний должен заметно превышать 130 км. Как отмечалось выше, от широты  $\Phi_{\text{mft}}^*$  к северу до авроральной области (на расстоянии около 700 км) интенсивность высыпаний плавно уменьшалась, быстрее это уменьшение происходило по направлению к югу (на расстоянии около 450 км).

2) Сеанс 20.05.2006 (№ 5; см. рис. 4б) характеризуется слабой авроральной и геомагнитной активностью: рост геомагнитной активности начался 17 мая, в день измерений регистрировалась лишь небольшая остаточная возмущённость. Дакт не регистрировался (из-за большого расстояния  $D^* = 68$  км). Наиболее интенсивные высыпания наблюдались на широте  $\Phi_{\text{mft}}^*$ . Размер зоны высыпаний поперёк геомагнитного меридиана здесь можно оценить как превышающий 140 км. От широты  $\Phi_{\text{mft}}^*$  к северу до области авроральных высыпаний (расстояние около 700 км) и на расстоянии около 600 км к югу интенсивность высыпаний плавно уменьшалась, но сама интенсивность высыпаний в южной части была намного меньше, чем в северной.

3) Сеанс 07.05.2007 (№ 8; см. рис. 4в) характеризуется повышенным уровнем геомагнитной и авроральной активности: геомагнитные возмущения начались за 9 дней до начала измерений, но 7 мая имел место повторный всплеск возмущённости. Измерения проводились при  $f_0 \approx f_{0F_2}$ . Во время нагрева возбуждался сильный  $F_{\text{spread}}$ . Дакт не регистрировался, что связывается с большим расстоянием  $D^* = 68$  км и близостью частоты ВН к  $f_{0F_2}$ . В этом сеансе наиболее интенсивные высыпания наблюдались на  $170 \div 310$  км севернее  $\Phi_{\text{mft}}^*$ . К северу от широты с максимальным

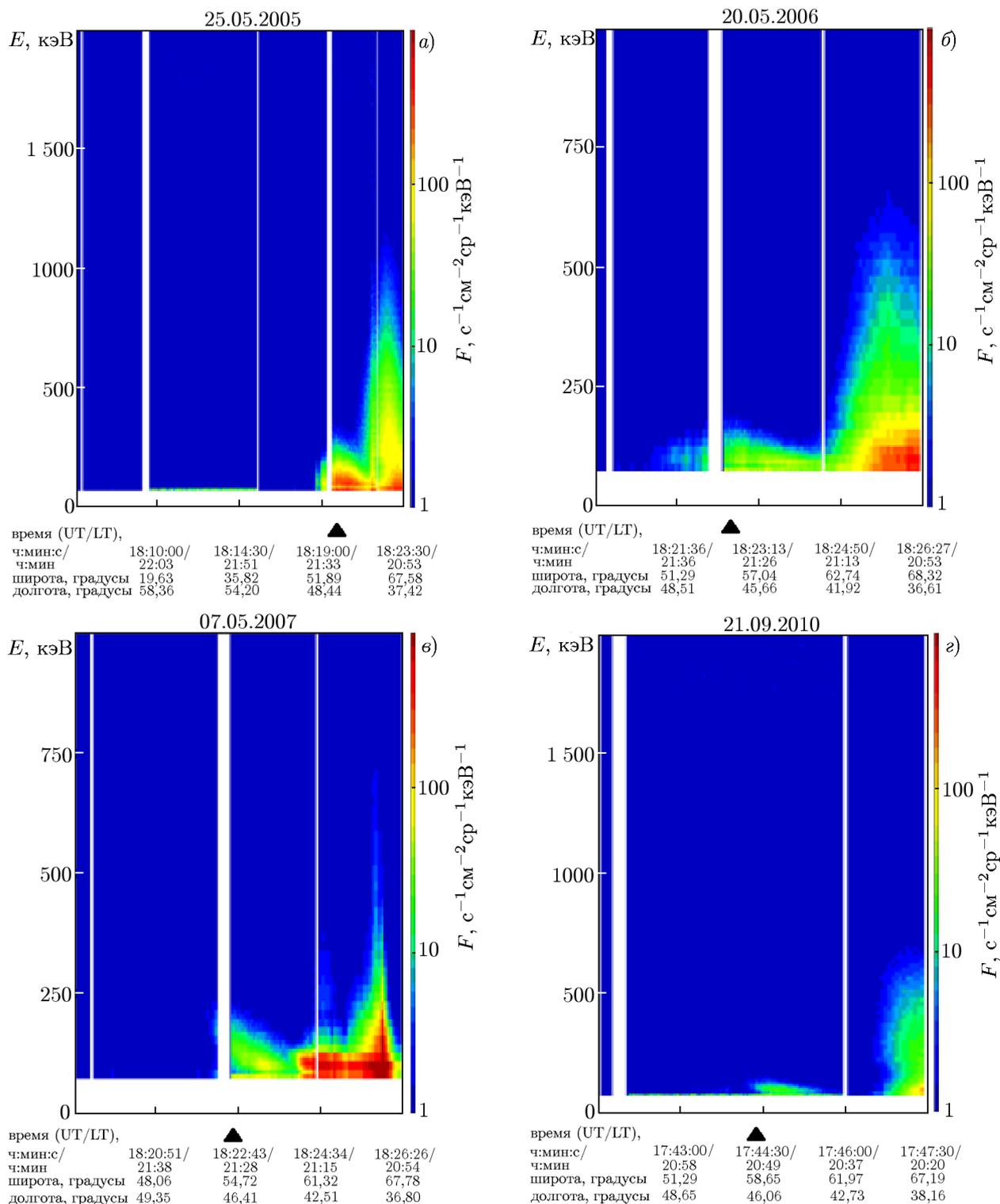


Рис. 4. Примеры сеансов, когда регистрировались искусственные высыпания в отсутствие дактов с увеличенной концентрацией плазмы (сеансы 2, 5, 8 и 21 на панелях *a*, *б*, *в* и *з*) соответственно

уровнем высыпаний их интенсивность на расстоянии около 450 км плавно уменьшалась с приближением к авроральной области, к югу от  $\Phi_{\text{mft}}^*$  интенсивность высыпаний уменьшалась резко.

Размер зоны высыпаний поперёк геомагнитного меридиана здесь можно оценить как превышающий 140 км. Близкие результаты были также получены 24.08.2006 (сеанс № 6).

4) Сеанс 21.09.2010 (№ 21; см. рис. 4г) характеризуется слабой авроральной и геомагнитной активностью, причём уровень возмущённости был низким в течение предыдущих четырёх недель. При модификации ионосферы возбуждался очень сильный  $F_{\text{spread}}$ . Дакт не мог быть обнаружен из-за большого расстояния  $D^* = 105$  км. Высыпания наблюдались только севернее широты  $\Phi_{\text{mft}}^*$  с максимумом их интенсивности в 210 км севернее  $\Phi_{\text{mft}}^*$  и с плавно спадающей интенсивностью дальше к северу до области авроральных высыпаний. Особенностью этого сеанса является то, что достаточно высокий уровень искусственных высыпаний здесь имел место несмотря на слабый уровень геомагнитной активности в течение длительного времени перед измерениями, при этом высыпания регистрировались только севернее  $\Phi_{\text{mft}}^*$ . Для понимания причины такого поведения высыпаний требуются дополнительные исследования. Близкие результаты были также получены 24.08.2007 (сеанс № 9).

5) В сеансе 22.08.2005 (№ 3) измерения проводились через 5 дней после начала геомагнитных возмущений. Минимальное расстояние между орбитой ИСЗ и центром возмущённой магнитной силовой трубки составляло  $D^* \approx 200$  км; поэтому дакт и плазменные возмущения аппаратурой ИСЗ в этом сеансе не могли быть обнаружены. Наблюдались интенсивные авроральные высыпания энергичных электронов с  $E > 1000$  кэВ севернее  $62,5^\circ$  с. ш. Около  $\Phi_{\text{mft}}^*$  регистрировался максимум интенсивности высыпаний энергичных электронов с  $E \approx 100$  кэВ. К северу интенсивность высыпаний плавно уменьшалась на расстоянии около 680 км и быстрее на расстоянии около 350 км — к югу. Заметим, что по своим характеристикам эти высыпания с учётом мощности ВН, близки к высыпаниям, зарегистрированным 25.05.2005 (сеанс № 2). Основываясь на этих данных, можно заключить, что в поперечном к силовым линиям геомагнитного поля направлении высыпания могут наблюдаться и на расстояниях около 200 км (а может быть, и даже дальше) от центра возмущённой магнитной силовой трубки.

При анализе всего объёма экспериментальных данных, полученных по программе «Сура» — DEMETER, надо принимать во внимание следующий факт. Только в 2005 году (в начале работы по этой программе) измерения проводились, когда ИСЗ пролетал на расстоянии  $D^*$  до 200 км от центра возмущённой магнитной силовой трубки. На таких расстояниях уже не регистрируются плазменные возмущения, которые, как правило, сосредоточены внутри трубки с диаметром около 100 км (или для  $D^* \leq 50$  км), опирающейся на область с сильно развитой искусственной ионосферной турбулентностью вблизи высоты отражения ВН [9]. Поэтому в более поздних экспериментах измерения проводились, только если расстояние  $D^*$  было меньше 75 км (редко при  $D^* \approx 100$  км). Это объясняет ограниченное число сеансов, проведённых при больших  $D^*$ , и связанную с этим невозможность более точно определить характер зависимости интенсивности высыпаний от  $D^*$ .

Суммируя все полученные экспериментальные данные, можно заключить, что область высыпаний вытянута вдоль геомагнитного меридиана, имея продольные размеры до 1300 км и поперечные — не меньше 400 км. Следует также отметить, что в условиях длительного отсутствия геомагнитных возмущений перед измерениями максимум интенсивности высыпаний может быть смещён к северу от  $\Phi_{\text{mft}}^*$  на 200–300 км при отсутствии высыпаний вблизи широты  $\Phi_{\text{mft}}^*$  (вблизи стенда «Сура»). Такое смещение может быть связано со следующими причинами. Во-первых, оно может быть обусловлено более высоким содержанием энергичных электронов на более высокоширотных магнитных силовых линиях (для  $L \geq 3$ ), когда они уже попадают во внешний радиационный пояс, при отсутствии таких электронов в трубке, отвечающей  $L \approx 2,6$ , которая опирается на область интенсивного взаимодействия мощной радиоволны с плазмой  $F_2$ -области ионосферы. Во-вторых, как показано в работах [20, 21], это может быть также связано с присутствием области

с достаточно интенсивной генерацией искусственной ионосферной турбулентности к северу от области, определяемой центром диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн. Последнее определяется рефракцией и фокусировкой лучей на области с развитыми искусственными километровыми неоднородностями концентрации плазмы в главной лепестке диаграммы направленности. Кроме того, усиление генерации искусственной турбулентности в этом направлении может быть поддержано достаточно интенсивным излучением мощной радиоволны в первом боковом лепестке диаграммы направленности антенны стенда при её наклоне на  $12^\circ$  на юг, что обычно используется в наших измерениях для достижения эффекта «магнитного зенита».

### 3. ИОНИЗАЦИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ЭНЕРГИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Представленные в данной работе результаты ясно демонстрируют, что модификация среднеширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами в поздние вечерние и предполуденные часы в определённых условиях стимулирует интенсивные высыпания электронов из радиационного пояса Земли с энергиями  $E \approx 100$  кэВ и с потоком до  $100 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$ . При этом зона высыпаний этих электронов имеет пространственные размеры около 1300 км вдоль геомагнитного меридиана с большей протяжённостью на север от стенда и не меньше 400 км поперёк его с максимальной интенсивностью высыпаний, как правило, в области расположения стенда. Такие электроны способны вызывать дополнительную ионизацию плазмы на высотах её  $D$ - и  $E$ -областей ( $h \approx 70 \div 130$  км), что приводит к увеличению поглощения радиоволн на этих высотах [6, 10–12, 14, 22]. Изменение величины поглощения достаточно легко детектируется в экспериментах и является диагностическим признаком появления высыпаний высокоэнергичных электронов из радиационного пояса Земли. Ясно, что, в отличие от спутниковых измерений, регистрация этого эффекта, например с помощью станций вертикального зондирования ионосферы, позволяет получить информацию об условиях появления высыпаний и их характерных временах, что даёт важные сведения об их природе. В нашем случае такие измерения были выполнены с помощью ионосферной станции, расположенной вблизи Казани на расстоянии 170 км на восток от стенда [23].

Выполненный в работе [23] анализ полученных экспериментальных данных, относящихся к вечерним часам измерений, показал существование эффекта поглощения проходящих через  $E$ -слой ионосферы сигналов вертикального зондирования в сеансах нагрева среднеширотной ионосферы излучаемыми стендом «Сура» мощными короткими радиоволнами с  $O$ -поляризацией. Характерное время нарастания поглощения (или появления энергичных электронов) составляло  $5 \div 10$  мин. При этом отмечалось наличие эффекта предыстории модификации ионосферы, когда в первом импульсе нагрева после длительной паузы в работе стенда подавление интенсивности зондирующего сигнала появляется только через 12 мин после включения ВН, однако оно начинает развиваться практически сразу после включения её второго импульса. Кроме того, после первого импульса ВН восстановление интенсивности сигнала длилось около  $5 \div 10$  мин и составляло только  $2 \div 4$  мин для её второго импульса. По результатам этой серии измерений можно также заключить, что для 3-го и следующих импульсов включения мощной радиоволны чёткая корреляция подавления интенсивности зондирующего сигнала с её включением нарушается: сигнал мог иметь малую интенсивность или, наоборот, быть максимальным как во время излучения мощной радиоволны, так и во время паузы нагрева. Это указывает на существование эффектов накопления и последствия от разных циклов излучения ВН, которое особенно сильно проявляется при коротких временах её излучения и паузы (например, при работе стенда в циклическом режиме [5 мин—излучение, 5 мин—пауза]). Основываясь на всех имеющихся данных, можно сде-

лать вывод, что для исследований подобного рода пауза в 15 мин между импульсами излучения ВН может оказаться слишком короткой, чтобы избежать проявления эффектов последействия и накопления, которые сильно искажают получаемые результаты и вносят большую неопределённость при их интерпретации.

Более детальное рассмотрение особенностей влияния стимулированных нагревом ионосферы мощными короткими радиоволнами высыпаний энергичных электронов на характеристики нижней ионосферы выходит за рамки данной работы и будет представлено в последующих публикациях. Перспективность этих исследований очевидна. В них, используя рутинные ионозондовые измерения и не проводя спутниковые измерения, которые в силу редкости пролёта ИСЗ в нужное время близко к центру возмущённой магнитной силовой трубки не позволяют получить требуемую информацию в полном объёме за разумную длительность проведения измерений, можно изучать динамические характеристики высыпаний, их суточную зависимость и зависимости от геомагнитной активности, возмущённости ионосферы и характеристик мощной радиоволны (её мощности, поляризации, угла наклона диаграммы направленности излучения, высоты отражения ВН и других). Кроме того, уже накопленный банк данных ионозондовых измерений позволяет выполнить часть этой работы без проведения новых широкомасштабных нагревных экспериментов.

#### 4. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В работе изучены особенности стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли при нагреве  $F_2$ -области среднеширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами. Эксперименты проводились в 2005–2010 годах на стенде «Сура» с регистрацией энергичных электронов бортовой аппаратурой французского ИСЗ DEMETER. Были определены признаки искусственного характера высыпаний энергичных электронов:

1) максимум интенсивности высыпаний наблюдается, как правило, внутри возмущённой магнитной силовой трубки, опирающейся на область наиболее интенсивной генерации искусственной ионосферной турбулентности и сильного разогрева ионосферной плазмы вблизи высоты отражения ВН, интенсивность высыпаний увеличивается при наличии дакта с увеличенной относительно фоновой концентрацией плазмы;

2) область высыпаний вдоль геомагнитного меридиана имеет размеры до 900 км к северу от стенда и до 400 км к югу от него; размер области высыпаний в ортогональном к меридиану направлении составляет не меньше 400 км;

3) максимальный поток высыпающихся электронов с  $F \approx 100 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$  имеет место для электронов с энергией  $E \approx 100 \text{ кэВ}$ ;

4) высыпания наблюдаются, когда эффективная мощность излучения ВН превышает 40 МВт и выполняются условия эффективного взаимодействия мощной радиоволны с плазмой  $F_2$ -слоя ионосферы. Отсутствие высыпаний после длительного периода низкой геомагнитной активности может быть связано с отсутствием энергичных электронов на оболочке с  $L \approx 2,6$ , расположенной между радиационными поясами Земли, на которой находится стенд «Сура».

Полученные экспериментальные данные позволяют оценить полную мощность, переносимую высыпающимися электронами с энергией порядка 100 кэВ как  $200 \div 600 \text{ кВт}$ , которая сравнима с высокочастотной мощностью  $P \approx 500 \text{ кВт}$ , генерируемой передатчиками нагревного стенда. На самом деле мощность, переносимая высыпающимися электронами, может быть в несколько раз больше, если учесть энергию электронов с  $\leq 70 \text{ кэВ}$  [18, 19], а также высыпания, которые наблюдаются и в магнитно-сопряжённой к стенду «Сура» ионосфере [24].

Рассмотренные в данной работе результаты по стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли и их влияния на нижнюю ионосферу позволяют дать интерпретацию до сих пор необъяснённого эффекта, обнаруженного ещё в первых экспериментах на стенде в Платтевилле (Колорадо, США) при измерении величины стимулированного нагревом поглощения радиоволн в  $D$ -области ионосферы, описание которого приведено в работе [25]. В этой работе было показано, что после длительного (10 мин) нагрева ионосферы мощными радиоволнами наблюдалась длительная (до 10 мин) релаксация поглощения пробных радиоволн, чего никогда не регистрировалось при коротких (40 мс) импульсах излучения ВН, для которых характерное время роста и ослабления поглощения были заведомо меньше 40 мс. Кроме того, нагрев ионосферы мощными радиоволнами с  $O$ -поляризацией здесь был более эффективен по сравнению с волнами с  $X$ -поляризацией. Оба результата не укладывались в рамки принятых тогда представлений о модификации нижней ионосферы мощными радиоволнами. Сейчас ясно, что наблюдаемые эффекты были связаны со стимулированными мощной радиоволной высыпаниями энергичных электронов, влияние которых на нижнюю ионосферу продолжается 10÷15 мин, и что для стимуляции высыпаний модификация ионосферной плазмы мощными радиоволнами с  $O$ -поляризацией является намного более эффективной из-за резонансного характера взаимодействия ВН с плазмой.

Как известно, эффективным механизмом стимулирования высыпаний энергичных электронов из радиационных поясов Земли является их взаимодействие с ОНЧ радиоволнами (вистлерами) [14, 26]. Для этого обычно используется либо непосредственное излучение этих волн наземными ОНЧ передатчиками, либо их генерация при демодуляции на ионосферных высотах модулированной по амплитуде мощной короткой радиоволны за счёт эффекта Гетманцева [27], которая особенно эффективна в высокоширотной ионосфере благодаря присутствию в ней сильной авроральной токовой струи.

Выполненные исследования [28–31] показали, что генерация ОНЧ волн возможна и при нагреве ионосферы, когда ВН излучается в режиме несущей. Это происходит за счёт возбуждения нижнегибридных волн при развитии тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости [4, 5] с последующей их трансформацией в ОНЧ волны, которые покидают область резонансного взаимодействия ВН с плазмой и вдоль силовых линий геомагнитного поля уходят в магнитосферу. Остающиеся вопросы, связанные с эффективностью рассматриваемой схемы генерации ОНЧ волн, требует отдельного рассмотрения.

Завершая обсуждение полученных результатов, следует отметить сделанный на основе экспериментов по высыпаниям энергичных электронов вывод, что область высыпаний вдоль геомагнитного меридиана может достигать размеров до 1300 км и что она сдвинута от стенда «Сура» более к северу, чем к югу. Объяснить столь большие пространственные размеры области с искусственными высыпаниями ещё только предстоит.

В работе не обсуждалось возможное влияние пучков высыпающих из радиационного пояса Земли высокоэнергичных электронов на ионосферную плазму, которые могут привести её в турбулентное состояние за счёт развития пучковой неустойчивости или вследствие возбуждения продольных токов [22, 32]. Также необходимо принимать во внимание, что ОНЧ волны могут возбуждаться электронами, ускоряемыми в области с интенсивной плазменной турбулентностью [33, 34]. Эти вопросы представляют несомненный интерес и будут являться предметом последующих исследований.

В заключение заметим, что высыпание высокоэнергичных электронов приводит к возбуждению атомов и молекул атмосферы Земли на ионосферных высотах, переводя их на ридберговские уровни. Переходя на более низкие энергетические уровни, эти атомы и молекулы излучают в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. В естественных условиях этот эффект

исследовался в работе [35]; недавно он был обнаружен и при модификации ионосферы мощными радиоволнами [36, 37]. Влияние искусственной генерации микроволнового излучения на состояние атмосферы Земли ещё только предстоит изучить.

Авторы благодарят сотрудников стенда «Сура» за помощь в организации и проведении экспериментов. Исследования В. Л. Фролова выполнялись при финансовой поддержке Минобрнауки (проект 3.1844.2017/4.6). Исследования И. А. Болотина выполнялись при поддержке РФФИ (проект 17-05-00475). Исследования А. О. Рябова выполнялись при поддержке РФФИ (проект 19-52-15007). Работа в части использования ионозонда КФУ «Циклон» выполнялась А. Д. Акчуриным и В. Л. Фроловым за счёт средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // УФН. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
2. Фролов В. Л. // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 2. С. 22.
3. Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Монография. Н. Новгород: Изд. ННГУ, 2017. 468 с.
4. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
5. Streltsov A. V., Berthelier J.-J., Chernyshov A. A., et al. // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. Art. no 118.
6. Черногор Л. Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2014. 541 с.
7. Марков Г. А., Белов А. С., Фролов В. Л. и др. // ЖЭТФ. 2010. Т. 138, вып. 6(12). С. 1037.
8. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, вып. 12. С. 908.
9. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Шорохова Е. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 3. С. 198.
10. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 527 с.
11. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 3. С. 173.
12. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. // Вестник ПГТУ: Телекоммуникации и радиотехника. 2016. № 2(30). С. 6.
13. Благоевская Н. Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. С.-Петербург: Гидрометеоздат, 2002. 287 с.
14. Inan U. S., Bell T. F., Bortnik J., Albert J. M. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, No. A5. Art. no. 1186.
15. Беликович В. В., Грач С. М., Караштин А. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545.
16. Бойко Г. Н., Васьков В. В., Голян С. Ф. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39, вып. 11. С. 533.
17. Sauvaud J. A., Moreau T., Maggiolo R., et al. // Plan. Space Sci. 2006. V. 54, No. 5. P. 502.
18. Лаштовичка Я. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 20, № 5. С. 999.
19. Ковтюх А. С., Панасюк М. И. // Плазменная гелиогеофизика. Т. 1. М.: Физматлит, 2008. С. 510.
20. Andreeva E. S., Frolov V. L., Kunitsyn V. E., et al. // Radio Sci. 2016. V. 51, No. 6. P. 638.
21. James H. G., Frolov V. L., Andreeva E. S., et al. // Radio Sci. 2017. V. 52. P. 259.

22. Мишин Е. В., Ружин Ю. Я., Телегин В. А. Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 264 с.
23. Фролов В. Л., Болотин И. А., Рябов А. О., Акчурин А. Д. // Тез. докл. XXVI Всеросс. открытой научной конф. «Распространение радиоволн», 1–6 июля 2019 г., г. Казань. Т. 2. С. 96.
24. Рябов А. О., Фролов В. Л. // Тез. докл. XXVI Всеросс. открытой научной конф. «Распространение радиоволн», 1–6 июля 2019 г., г. Казань. Т. 2. С. 75.
25. Utlaut W. F., Violette E. J. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 895.
26. Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю. Альфвеновские мазеры. Горький: ИПФ РАН, 1986. 190 с.
27. Беляев П. П., Котик Д. С., Митяков С. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 248.
28. Vas'kov V. V., Bud'ko N. I., Kapustina O. V., et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 1998. V. 60. P. 1261.
29. Vartanyan A., Milikh G. M., Eliasson B., et al. // Radio Sci. 2016. V. 51. P. 1188.
30. Eliasson B., Papandopoulos K. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. no. A09315.
31. Borisov N. D. // Phys. Lett. A. 1995. V. 206. P. 240.
32. Ораевский В. Н. Плазма на Земле и в космосе. Киев: Наукова думка, 1980. С. 204 с.
33. Васьков В. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 2. С. 163.
34. Васьков В. В., Комраков Г. П., Ораевский В. Н. и др. // Геомагн. и аэроном. 1995. Т. 35, № 1. С. 154.
35. Троицкий В. С., Бондарь Л. Н., Стародубцев А. М. // Докл. АН СССР. 1973. Т. 212, № 3. С. 719.
36. Троицкий А. В., Фролов В. Л., Востоков А. В., Ракуть И. В. // Тез. докл. XXVI Всеросс. открытой научной конф. «Распространение радиоволн», 1–6 июля 2019 г., г. Казань. Т. 2. С. 91.
37. Троицкий А. В., Фролов В. Л., Востоков А. В., Ракуть И. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 10 (принята в печать).

Поступила в редакцию 26 марта 2019 г.; принята в печать 30 сентября 2019 г.

### PRECIPITATION OF ENERGETIC ELECTRONS FROM THE EARTH'S RADIATION BELT STIMULATED BY HIGH-POWER HF RADIO WAVES FOR MODIFICATION OF THE MIDLATITUDE IONOSPHERE

*V. L. Frolov, A. D. Akchurin, I. A. Bolotin, A. O. Ryabov, J. J. Berthelier, and M. Parrot*

Based on the results of the experiments performed in 2005–2010 within the framework of the Sura—DEMETER mission, we analyze the features of the precipitations of energetic electrons (with energies  $E \approx 100$  keV) from the Earth's radiation belt. The modification of the ionospheric  $F_2$  region was conducted by means of high-power HF O-mode radio waves radiated in the CW regime. The precipitations were detected using the equipment onboard DEMETER, a French microsatellite. The conditions of precipitation appearance were determined, and it was found that the electron precipitation region was stretched along the geomagnetic meridian to a distance of 1300 km; the size of the region in the transverse direction is about 400 km. It was shown by ionosonde measurements that such precipitations lead to increased absorption of radio waves in the lower ionosphere. It is assumed that the mechanism for precipitation of electrons from the Earth's radiation belt is determined by the interaction of energetic electrons with VLF radio waves, which are generated due to the interaction of the amplitude-unmodulated O-mode pump wave with the ionospheric plasma near the wave reflection height.

*В. Л. Фролов, А. Д. Акчурин, И. А. Болотин и др.*