

УДК 533.951+537.86+537.876

ИСКУССТВЕННЫЕ ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТОСОПРЯЖЁННОЙ ОТНОСИТЕЛЬНО СТЕНДА «СУРА» ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

А. О. Рябов^{1*}, В. Л. Фролов^{1,2}, А. Д. Акчурин²

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород;

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Проанализированы свойства высыпаний энергичных электронов (с максимальными значениями энергии $E \approx 150$ кэВ) из радиационного пояса Земли в магнитосопряжённую относительно стенда «Сура» область ионосферы при модификации F_2 -области ионосферы мощными короткими радиоволнами с О-поляризацией в режиме их непрерывного излучения. Высыпания регистрировались аппаратурой спутника DEMETER на высоте 660 км. Определены критерии, при выполнении которых наблюдались искусственные высыпания, установлено, что область высыпаний вытянута вдоль геомагнитного меридиана на расстояние до 2 200 км; её размеры в поперечном направлении превышают 500 км. Проведено сравнение между характером высыпаний энергичных электронов в магнитосопряжённой области и непосредственно в области, возмущённой мощными короткими радиоволнами стенда «Сура».

ВВЕДЕНИЕ

Возмущение верхней ионосферы мощными короткими радиоволнами приводит к развитию в ней различных нелинейных явлений и плазменных неустойчивостей. Это вызывает возбуждение мощной радиоволной высокочастотной и низкочастотной плазменной турбулентности вблизи высоты отражения. В результате в этой области наблюдается сильный разогрев плазмы, ускорение электронов до сверхтепловых энергий, генерация электрических полей и токов, изменение формы профиля плазмы и другие эффекты, что может приводить к модификации ионосферно-магнитосферных связей.

Первым подтверждением возможности стимуляции высыпаний энергичных электронов в среднеширотной ионосфере на стенде «Сура» стал эксперимент, выполненный 12 мая 2008 года. В нём было обнаружено, что формирование плазменного дакта на высотах внешней ионосферы ($h \approx 660$ км) приводило к усилению потока энергичных электронов с максимумом энергии при $E \approx 100$ кэВ. На основе этих результатов в статье [1] было сделано заключение, что наблюдающееся высыпание электронов обусловлено управляемым возбуждением магнитосферного мазера путём формирования мощным радиоизлучением наземного коротковолнового передатчика искусственного волноводного канала — дакта с увеличенной концентрацией плазмы [2, 3]. Последующий анализ всего объёма собранных в рамках эксперимента «Сура»—DEMETER данных показал присутствие высыпаний и во многих других случаях, что обусловило продолжение этих исследований с целью более подробного изучения природы наблюдаемых явлений. В работе [4] были детально изучены особенности стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли при нагреве F_2 -области среднеширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами в поздние вечерние часы ($T \approx 18:00$ UT) и были определены признаки искусственного характера высыпаний энергичных электронов. К отличительным чертам искусственных высыпаний относятся:

* RyabovAIOI@yandex.ru

1) максимум интенсивности высыпаний наблюдался внутри возмущённой магнитной силовой трубки, опирающейся на область наиболее сильного разогрева ионосферной плазмы вблизи высоты отражения волны накачки (ВН);

2) в плоскости геомагнитного меридиана интенсивность высыпаний от центра возмущённой магнитной силовой трубки плавно уменьшалась в направлении севера, простираясь до области авроральных широт, и значительно более резко к югу;

3) максимальные потоки высыпающихся электронов наблюдаются при их энергиях порядка 100 кэВ;

4) высыпания наблюдались, когда эффективная мощность излучения ВН составляла не менее 40 МВт и имело место эффективное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой F_2 -слоя ионосферы;

5) имела место связь высыпаний с возмущённостью ионосферы: если за 10 и более дней до сеанса геомагнитных возмущений не было, то высыпания энергичных электронов на широте станда «Сура», как правило, не регистрировались.

Ещё одной актуальной задачей, связанной с модификацией F_2 -области ионосферы, является анализ характеристик ионосферы в магнитосопряженной области (МСО) относительно области, возмущённой наземными передатчиками. При этом станд «Сура» обладает выгодным географическим положением, т. к. возмущённая им магнитная силовая трубка проходит между между внешним и внутренним радиационными поясами Земли (параметр Мак-Илвейна $L \approx 2,6$) в отличие, например, от станда HAARP ($L \approx 4,9$) [5], для которого характерен высокий уровень естественного фона высыпаний.

В данной работе демонстрируются результаты исследований стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли в магнитосопряженную относительно станда «Сура» область ионосферы при модификации среднеширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами с О-поляризацией, излучаемыми этим стандом. Эти исследования основаны на выполненных в 2005–2010 годах экспериментах по программе «Сура»—DEMETER [3].

1. ОПИСАНИЕ УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При проведении экспериментов по стимуляции высыпаний в МСО использовались различные временные режимы нагрева F_2 -области ионосферы, однако обычно нагрев длился 30÷45 мин, и включался за 25÷40 мин до пролёта спутника над стандом через возмущённую магнитную силовую трубку, опирающуюся на область с сильно развитой турбулентностью вблизи высоты отражения ВН. В большинстве случаев использовался наклон диаграммы направленности излучающей антенны станда на 12° на юг, чтобы увеличить эффективность генерации искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта «магнитного зенита», когда на высоте верхнегибридного резонанса выполняется условие распространения мощной радиоволны с О-поляризацией вдоль силовых линий геомагнитного поля [6–9]. Измерения были выполнены в 2005–2010 годах в спокойных геомагнитных условиях в период затянувшегося минимума солнечной активности.

Станд «Сура» (НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского; его координаты: $56,15^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д.) расположен в 120 км к востоку от Нижнего Новгорода [10]. Максимальная эффективная мощность излучения станда в режиме синхронной работы всех трёх его модулей составляет около 80 МВт на частоте волны накачки $f_0 \approx 4\,300$ кГц, увеличиваясь с ростом f_0 примерно до 180 МВт для $f_0 \approx 6\,800$ кГц.

Для диагностики использовался французский спутник DEMETER, который был запущен в 2004 году на круговую солнечно-синхронную полярную орбиту с наклоном $98,3^\circ$ и высотой около 660 км. Над МСО спутник пролетал в 18:00–18:30 UT в поздние вечерние часы. Он был

оснащён широким набором инструментов и практически идеально подходил для детектирования плазменных возмущений, возбуждаемых в ионосфере при её модификации мощными короткими радиоволнами. Регистрация энергичных электронов осуществлялась с помощью спектрометра IDP, который проводил измерения их энергии и потока в диапазоне энергий от 70 кэВ до 2,5 МэВ с разрешением 1 с при его включении в режиме «burst mode» [11]. Детальное описание всей бортовой аппаратуры спутника приведено в [12]. Необходимо отметить, что при анализе полученных экспериментальных данных и представления их в данной работе нами использовалось всемирное время UT, которое для периода проведения измерений было связано с московским летним временем MSK как $UT = MSK - 4$ ч.

Важным вопросом, связанным с анализом проведённых экспериментов, являлось определение местонахождения МСО. Существуют разные способы расчётов магнитосопреженных точек (ИКИ РАН, ИЗМИРАН, NASA и другие) [13], которые дают координаты центра МСО с разбросом в $2^\circ \div 3^\circ$ как по широте, так и по долготе. На основании анализа полученных к настоящему времени экспериментальных данных нами было определено положение магнитосопреженной области относительно возмущённой радиоизлучением стенда «Сура» магнитной силовой трубки: центр возмущённой силовой трубки находился в точке с координатами $40,5^\circ$ ю. ш., $61,5^\circ$ в. д. Отметим, что положение центра возмущённой силовой трубки зависит от высоты отражения волны накачки, значение которой в рассматриваемых экспериментах изменялось от 220 до 270 км. Однако, неучёт данного факта даёт погрешность не более $0,2^\circ$ по широте и долготе, которую в наших оценках можно было не учитывать.

2. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

2.1. Регистрация высыпаний энергичных электронов в естественных условиях

Для изучения свойств естественных высыпаний в МСО были проанализированы более 20 сеансов измерений, выполненных в апреле–октябре 2005–2010 годов, когда стенд «Сура» не работал. В процессе обработки экспериментальных данных анализировались: а) широта северной границы области сильных авроральных высыпаний; б) широта северного края области, где ещё регистрировались потоки электронов слабой интенсивности; в) как характеристики высыпаний связаны с индексами геомагнитной активности K_p (или его суточным значением ΣK_p) и индексом авроральной электроструи АЕ, а также с фазой развития геомагнитной возмущённости. Полученные при этом данные были использованы для выработки критериев, с помощью которых можно было выделить высыпания энергичных электронов, стимулированные модификацией ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура», на фоне их естественной составляющей.

На рис. 1а, б и в представлены данные измерений естественных высыпаний в МСО за сеансы 25.05.2008, 18.02.2010 и 06.05.2010 соответственно. Треугольниками отмечен предполагаемый центр МСО. По горизонтальной оси отложено время, широта (слева — юг (аврора), справа — север) и долгота, по вертикальной — энергия электронов (спектрометр IDP не регистрировал электроны с энергией менее 70 кэВ), интенсивность высыпаний энергичных электронов определяется через поток частиц, размерность которого есть $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}\text{кэВ}^{-1}$ (ниже для сокращения записи размерность будет опускаться). На рисунке дополнительно указаны характеристики геомагнитной активности: трёхчасовой K_p -индекс в момент пролёта спутника; суммарный суточный индекс ΣK_p в день пролёта (в скобках суточный K_p -индекс за вчерашний и позавчерашний день относительно дня пролёта); АЕ в момент пролёта и средний индекс $\langle \text{АЕ} \rangle$ в день пролёта. Представленные рисунки позволяют отметить большие значения энергий и потоков в авроральной области,

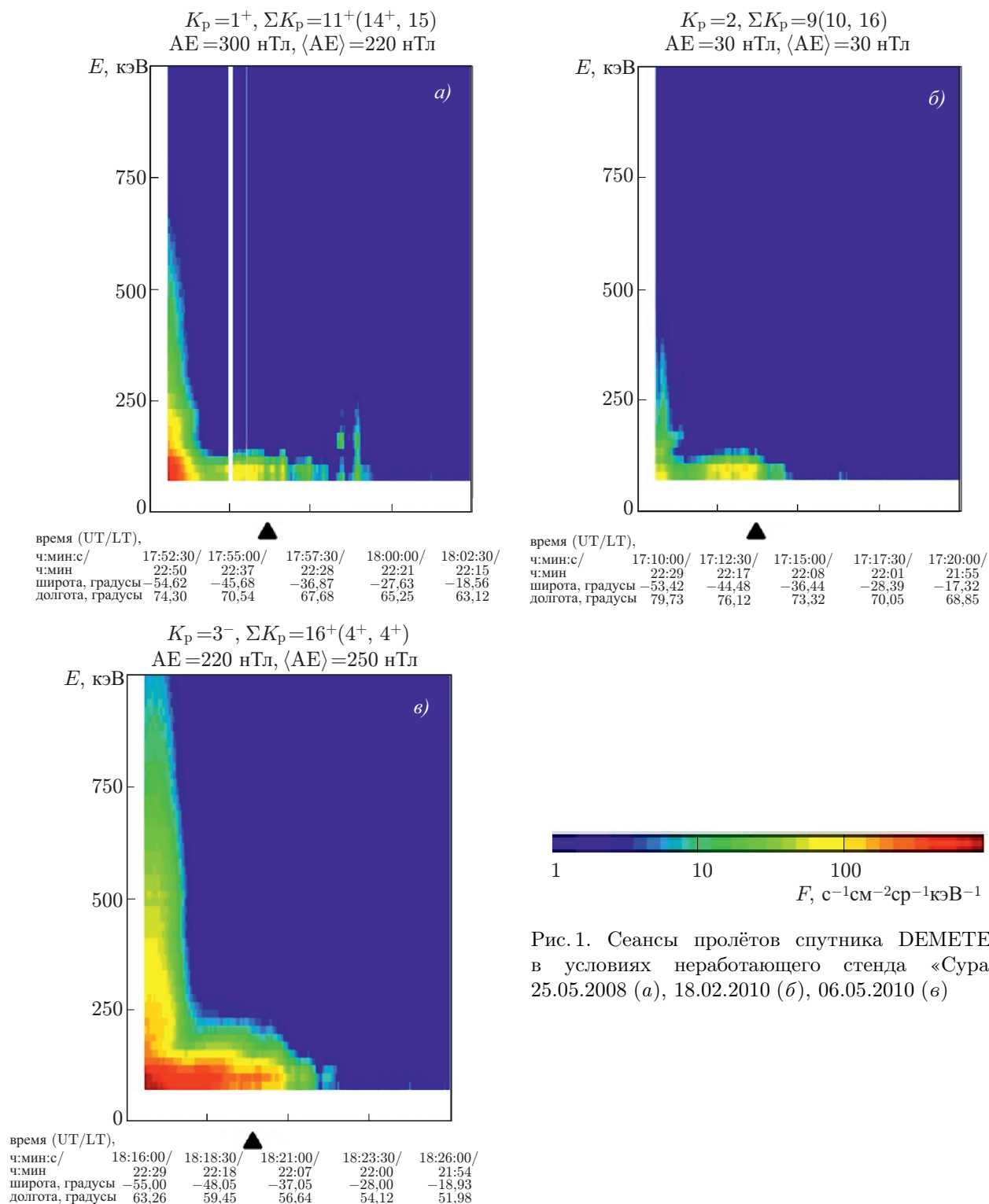


Рис.1. Сеансы пролётов спутника DEMETER в условиях неработающего стенда «Сура»: 25.05.2008 (а), 18.02.2010 (б), 06.05.2010 (в)

которые значительно увеличиваются с ростом геомагнитной активности. В области примерно от 46° до 53° ю.ш. наблюдается незначительное уменьшение энергии относительно последующего роста в более южных областях. Однако в случае больших значений AE , как на рис. 1в, это уменьшение становится практически незаметно. В целом интенсивность наблюдаемых явлений

зависит от характеристик геомагнитной активности. Энергии высыпающих электронов в МСО не превышают 120 кэВ даже в случаях достаточно больших значений АЕ.

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы.

1) Во время авроральной активности невысокого уровня ($K_p \leq 2$ в течение нескольких предшествующих измерениям дней, при этом в день измерений индекс АЕ не превышал $150 \div 200$ нТл) северная граница интенсивных высыпаний на долготе центра МСО для времени $T \approx 18:00$ UT, когда проводились измерения спутником DEMETER, не опускается ниже географической широты $39^\circ \div 40^\circ$ ю. ш. Севернее этой области высыпания либо вообще отсутствовали, либо имели низкую интенсивность с энергией электронов $E \leq 100$ кэВ при величине их потока $F \leq 10$. Таким образом, широта границы с сильными высыпаниями при невысоком уровне авроральной активности находится заметно южнее широты центра МСО.

2) С ростом значений индекса АЕ северная граница области с сильными естественными высыпаниями опускается на более северные широты, и при $AE \geq 200$ нТл она уже может достигать $36^\circ \div 37^\circ$ ю. ш. При этом положение северной границы зоны высыпаний в большей степени контролируется среднесуточным значением АЕ, а не его текущим значением во время измерений.

3) Уменьшение энергии высыпающих электронов в направлении от центра МСО к авроральной области (т. е. в области от 46° до 53° ю. ш.) относительно незначительно (падение не превышает $10 \div 20$ кэВ).

4) Наблюдаемые значения энергий и потоков высыпающих электронов сильнее зависят от индекса АЕ, чем от K_p .

Полученные в рамках анализа сеансов при неработающем стенде «Сура» результаты позволяют более строго отделить естественные высыпания от искусственных, стимулируемых нагревом стенда. Как и следовало ожидать, полученные нами характеристики естественных высыпаний в МСО совпадают с параметрами естественных высыпаний над стендом [4].

2.2. Регистрация высыпаний энергичных электронов в условиях стимуляции ионосферы мощными короткими радиоволнами стенда «Сура»

Учитывая результаты, полученные в разделе 2.1, проанализируем наблюдения, когда на стенде «Сура» выполнялись эксперименты по модификации F_2 -области ионосферы с целью стимулирования искусственных высыпаний в МСО. Всего было выполнено более 20 экспериментов, что позволило определить характерные особенности наблюдаемых явлений и сформулировать критерии появления искусственных высыпаний в МСО.

На рис. 2а и б (сеансы за 16.05.2008 и 19.05.2008 соответственно) представлены наиболее типичные результаты измерений высыпаний энергичных электронов в сеансах пролётов спутника DEMETER через МСО при работе стенда «Сура». Как видно из рис. 2, в центре МСО наблюдаются искусственные высыпания со значениями $E \geq 150$ кэВ и $F \geq 100$. Но наиболее важным фактором, отличающим данные сеансы от сеансов при неработающем стенде «Сура», является резкое уменьшение энергии высыпающих электронов в области $46^\circ \div 53^\circ$ ю. ш., что является нехарактерным для естественных высыпаний. Наиболее результативным является сеанс за 16.05.2008, представленный на рис. 2а: искусственные высыпания регистрируются в полосе $30^\circ \div 50^\circ$ ю. ш., т. е. область высыпаний вытянута почти на 2200 км вдоль магнитного меридиана. По результатам выполненных измерений размер зоны высыпаний поперёк геомагнитного меридиана можно оценить как 500 км, исходя из её протяжённости с запада на восток от $61,5^\circ$ до $67,0^\circ$ в. д.

Сеанс, представленный на рис. 2б (18.08.2010), характеризуется интересной особенностью. Обычно профиль значений энергий искусственных высыпаний имеет максимум примерно в цен-

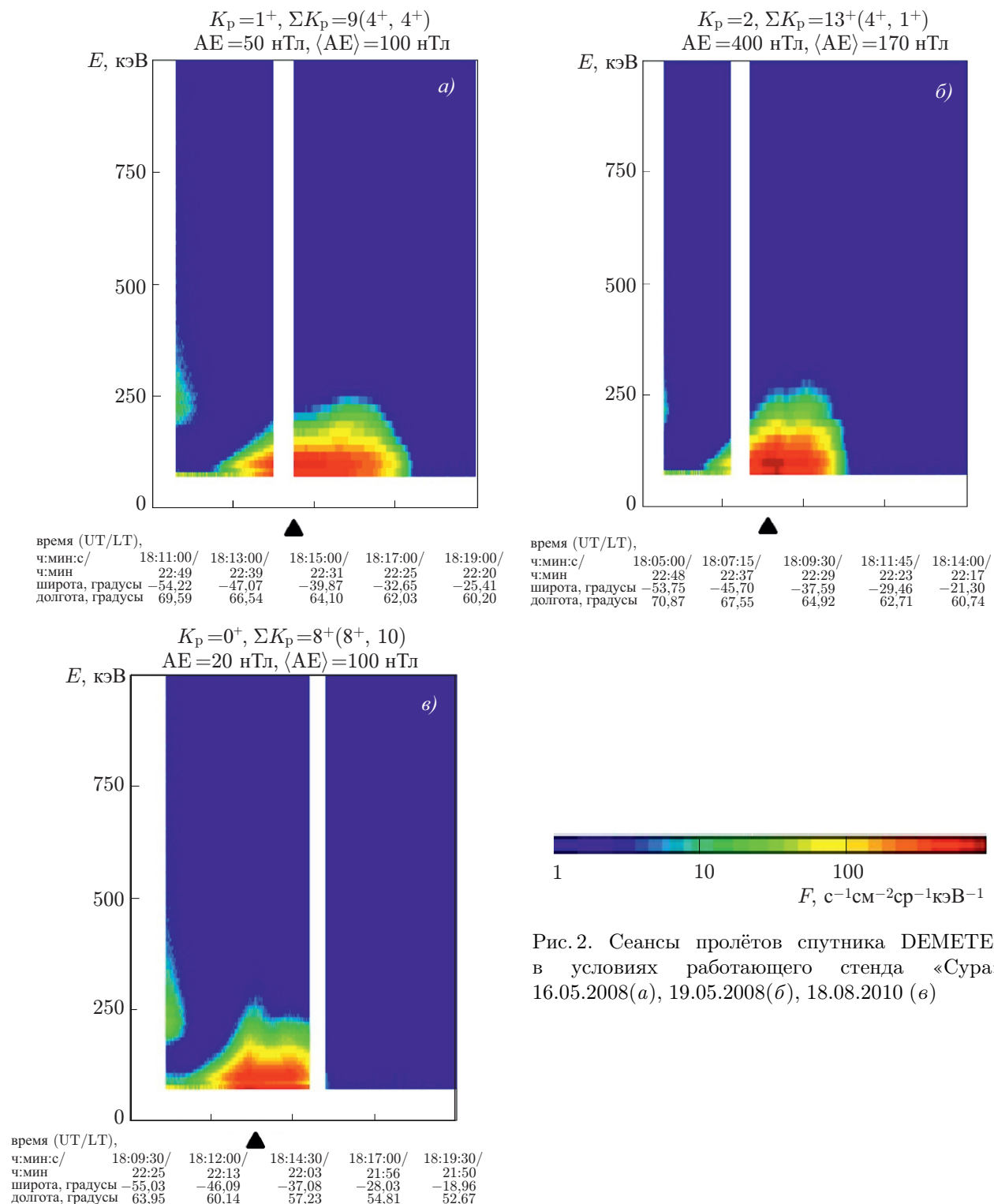


Рис. 2. Сеансы пролётов спутника DEMETER в условиях работающего стенда «Сура»: 16.05.2008(а), 19.05.2008(б), 18.08.2010 (в)

тре МСО (или на $1^\circ \div 2^\circ$ южнее, что, возможно, объясняется ошибкой в определении центра МСО или пространственным распределением энергичных электронов по магнитной силовой трубке). Профиль же энергий для сеанса за 18.08.2010 отличается от обычной формы: наблюдается дополнительное увеличение энергии (на 30 кэВ относительно ожидаемого значения) точно над центром

МСО с масштабом около 100 км. Подобный сеанс был не единственным.

Помимо сеансов с явным присутствием искусственных высыпаний, приведённых на рис. 2, были сеансы, в которых не удалось обнаружить заметных высыпаний энергичных электронов с высокой степенью достоверности. Примеры таких сеансов представлены на рис. 3а, б и в (за 26.04.2010, 02.10.2010 и 09.10.2010 соответственно). Характер высыпаний, наблюдаемых в представленных на рис. 3а и б сеансах, не отличается от случаев естественных высыпаний. В то же время высыпания, наблюдаемые на рис. 3в, можно считать следствием стимуляции ионосферы мощными короткими радиоволнами, т. к. наблюдается резкое уменьшение энергии в области $46^\circ \div 53^\circ$ ю. ш. В данном сеансе значения потоков относительно невелики ($F = 10$), а сама область высыпаний занимает всего около 300 км вдоль орбиты спутника.

По итогам проведённых сеансов были сформулированы условия стимуляции искусственных высыпаний в магнитосопряжённой области. Необходимо, чтобы:

- а) частота ВЧ f_0 не превышала критическую частоту F_2 -области f_{0F_2} (пример невыполнения этого условия представлен на рис. 3б);
- б) мощность ВЧ $P_{\text{eff}} \geq 50$ МВт;
- в) отсутствовал спорадический E -слой, экранирующий F_2 -область ионосферы;
- г) прошло менее 15 дней после последней суббури (в противном случае низкая степень наполненности возмущаемой магнитной силовой трубки энергичными электронами будет препятствовать стимуляции высыпаний — см. рис. 3а).

На основании проведённых экспериментов искусственные высыпания высокоэнергичных электронов в МСО из радиационного пояса Земли, вызванные стимуляцией ионосферы мощными короткими радиоволнами, имеют следующие характеристики:

- а) максимальная энергия высыпающихся электронов составляет $E \sim 150$ кэВ при потоке $F \geq 10$, даже в случаях относительно спокойных геомагнитных условий;
- б) максимум интенсивности высыпаний наблюдается в центре МСО, т. е. внутри возмущённой магнитной силовой трубки;
- в) к югу от МСО наблюдается резкое уменьшение энергии высыпающихся частиц (от 46° до 53° ю. ш.);
- г) зона стимулированных модификацией ионосферы высыпаний энергичных электронов в магнитосопряжённой области может иметь пространственные размеры до 2 200 км вдоль геомагнитного меридиана и до 550 км поперёк него.

Стоит отметить, что при сравнении экспериментов по стимуляции высыпаний в области над станцией «Сура» [4] с экспериментами по измерению высыпаний в МСО во втором случае наблюдается значительно больший разброс как энергий, так и потоков: больше доля и сеансов с очень заметными эффектами ($E \geq 150$ кэВ, $F \geq 100$), и неудачных сеансов, когда искусственные высыпания нельзя выделить на фоне естественных. Важно, что средние значения энергий и потоков в обоих полушариях оказываются практически одинаковыми.

В экспериментах по стимуляции высыпаний траектория пролёта спутника, как правило, проходила так, что не представлялось возможным провести измерения как над станцией, так и в МСО. Однако имеется сеанс за 24.08.2007, когда спутник пролетел примерно в 150 км от центра возмущённой станцией «Сура» области («над головой») и в 100 км от центра МСО (см. рис. 4а). Прочие условия оказались очень благоприятными, поэтому удалось зарегистрировать высыпания в обеих областях (см. рис. 4б). Результаты этого сеанса подтверждают сделанные выше выводы и заключение о том, что необходимые условия для наблюдения высыпаний над станцией и в МСО практически одинаковы.

Важным вопросом, связанным с воздействием нагревного станда «Сура» на ионосферу, является влияние высыпающихся энергичных электронов на поглощение радиоволн, которое можно

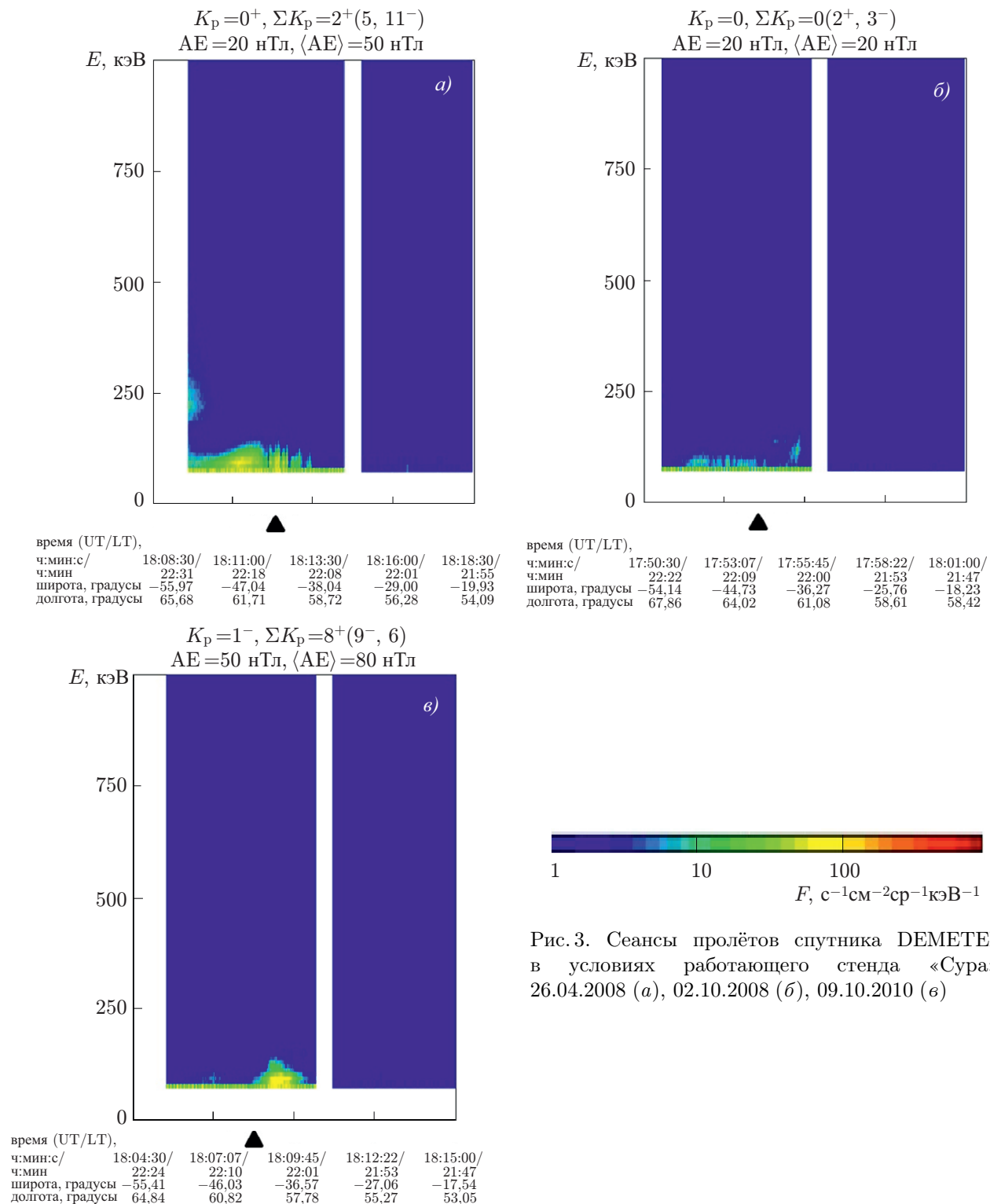
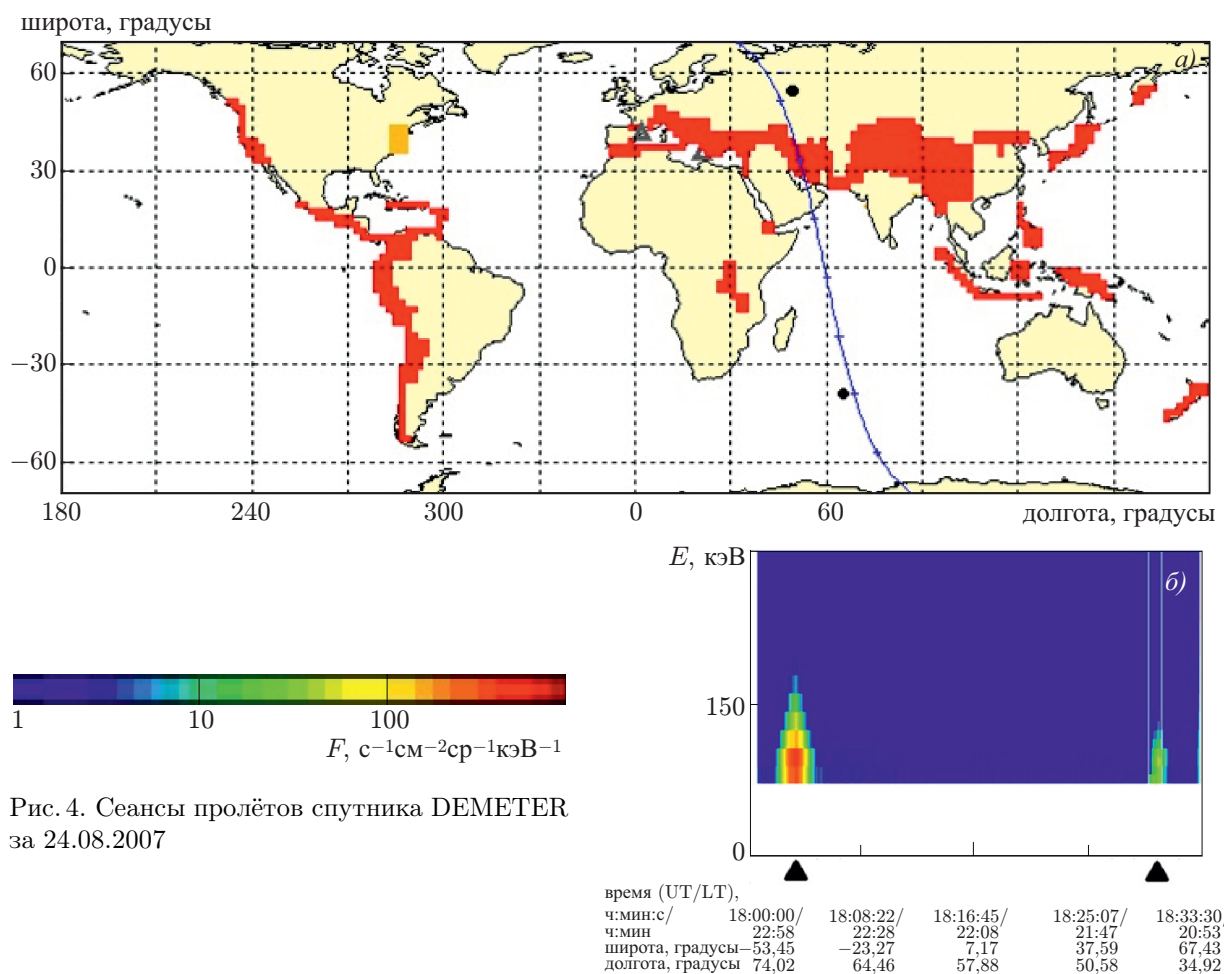


Рис. 3. Сеансы пролётов спутника DEMETER в условиях работающего стенда «Сура»: 26.04.2008 (а), 02.10.2008 (б), 09.10.2010 (в)

фиксировать с помощью ионограмм. Этот вопрос был подробно проанализирован в работе [4], в рамках которой, как и в данной работе, использовались результаты, полученные с помощью цифрового ионозонда КазФУ (г. Казань, 170 км от стенда «Сура»). К сожалению, возможность получать ионограммы в режиме одна ионограмма в минуту появилась только после февраля 2010



года, поэтому большая часть экспериментов, выполненных по программе «Сура»—DEMETER, не поддаётся анализу на предмет воздействия нагрева стэнда на поглощение радиоволн (ионограммы, получаемые с меньшей частотой съёма, неинформативны для данной цели). Редким сеансом, который можно было использовать для данного анализа, является сеанс за 18.08.2010 (ионограммы, соответствующие этому сеансу, представлены на рис. 5). В этом сеансе уже через 3 мин (см. на рис. 5б) после включения стэнда «Сура» на ионограммах стало наблюдаться ослабление отражённого от F_2 -слоя ионосферы сигнала, через 6 мин (см. рис. 5в) сигнал второго отражения исчез полностью. После выключения стэнда началось постепенное восстановление естественного вида ионограмм через 7 мин (см. на рис. 5г). Вскоре после этого критическая частота слоя F_2 стала падать, из-за чего последующее восстановление профиля ионограммы не произошло. Важно отметить, что E -слой был слаб и не проявлялся на ионограммах. Эти измерения подтверждают присутствие заметного поглощения радиоволн в ионосфере над Казанью, стимулированного высыпаниями энергичных электронов при её нагреве излучением стэнда «Сура», как это ранее наблюдалось в [4].

ВЫВОДЫ

В данной работе приводятся результаты измерений свойств естественных высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли в МСО стэнда «Сура» для различных геофи-

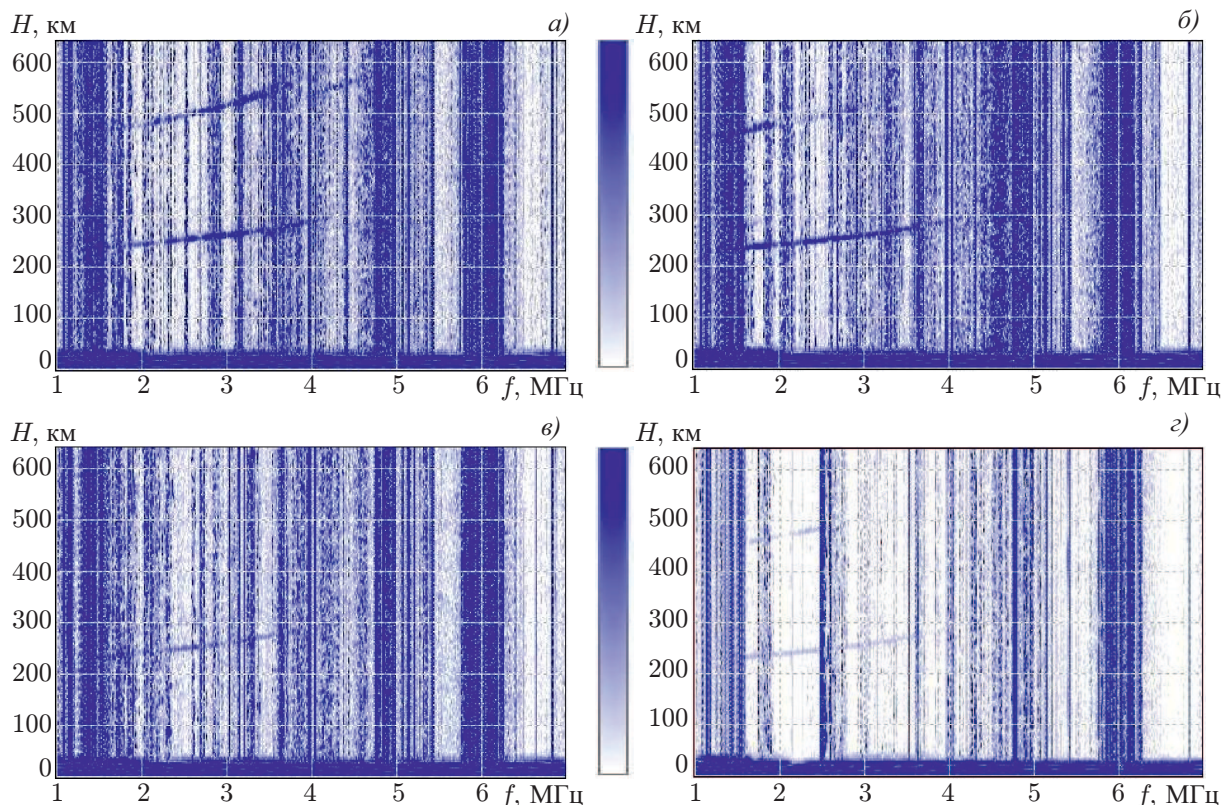


Рис. 5. Ионограммы для сеанса за 18.08.2010 (H — высота): момент включения станда «Су-ра» (а; 21:31 MSK), 3 мин после включения (б; 21:34 MSK), 6 мин после включения (в; 21:37 MSK), 7 мин после выключения (г; 22:21 MSK). Для панелей а–в усиление 0 дБ, для панели г 10 дБ.

зических условий. Показано, что их уровень сильнее зависит от индекса АЕ в день измерений, чем от индекса K_p , и что при достаточно сильных возмущениях (с $AE \geq 250$ нТл) естественные высыпания энергичных электронов высокой интенсивности могут регистрироваться вплоть до широты центра МСО и даже севернее.

Были изучены особенности стимуляции высыпаний энергичных электронов в МСО при нагреве F_2 -области среднеширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами в поздние вечерние часы ($T \approx 18:00$ UT) и определены признаки их искусственного происхождения:

а) высыпания наблюдаются, когда эффективная мощность излучения ВН превышает 50 МВт и имеет место эффективное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой F_2 -слоя ионосферы;

б) даже в случаях относительно спокойных геомагнитных условий средняя энергия высыпающихся электронов составляет около 120 кэВ при средней величине потоков порядка $10 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \times \text{ср}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$;

в) максимальная интенсивность высыпаний наблюдается в центре МСО, т.е. внутри возмущённой магнитной силовой трубки;

г) наблюдается резкое уменьшение энергии высыпающихся частиц (на 20 кэВ и более) по направлению от центра МСО к авроральной области (примерно от 46° до 53° ю. ш.).

Результаты выполненных исследований позволяют заключить, что в тех случаях, когда не выполнялись условия генерации интенсивных плазменных возмущений вблизи высоты отражения ВН, не наблюдалась стимуляция высыпаний энергичных электронов, которые имели бы явно

искусственный характер. Все эти условия соответствуют требованиям генерации искусственной ионосферной турбулентности [3], хотя, как было показано в данной работе, их выполнение не является достаточным для стимуляции искусственных высыпаний (например, низкая степень наполненности радиационного пояса энергичными электронами будет являться причиной отсутствия высыпаний).

Важно отметить, что энергии и потоки высыпающихся электронов, полученные в рамках данной работы, оказались сопоставимы со значениями этих величин в случае исследования аналогичных явлений в возмущённой магнитной силовой трубке над стендом «Сура» ($F \geq 10$ для электронов с энергией $E \sim 100$ кэВ).

Область высыпаний вдоль геомагнитного меридиана в экспериментах по стимуляции высыпаний в МСО имеет размеры до 2 200 км вдоль геомагнитного меридиана и до 500 км поперёк него. Этот результат превосходит результаты сеансов стимуляции искусственных высыпаний стендом «Сура», где область высыпаний была вытянута вдоль геомагнитного меридиана на расстояние до 1 100 км; размеры области в поперечном направлении составляли около 400 км.

Механизмом стимулирования высыпаний энергичных электронов из радиационных поясов Земли является их взаимодействие с радиоволнами очень низких частот (ОНЧ) [14, 15]. 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. Выполненные исследования [16–18] 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 [9, 19] с их последующей трансформацией в ОНЧ волны, которые покидают область резонансного взаимодействия ВН с плазмой и вдоль силовых линий геомагнитного поля уходят в магнитосферу.

Авторы благодарят сотрудников стенда «Сура» за помощь в организации и проведении экспериментов. Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект 0729–2020–0057). Представленные в докладе исследования А. О. Рябова выполнялись при финансовой поддержке РФФИ (проект 19–52–15007). Работа в части использования ионозонда КазФУ «Циклон» выполнялась 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. Марков Г. А., Белов А. С., Фролов В. Л. и др. // Журн. эксперим. теорет. физики. 2010. Т. 138, № 6(12). С. 1 037–1 042.
2. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, № 12. С. 908–913.
3. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Шорохова Е. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 3. С. 198–222.
4. Фролов В. Л., Акчурин А. Д., Болотин И. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 9. С. 641–663.
5. Platino M., Inan U.S., Bell T.F., et al. // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. Art. no. L16101. <https://doi.org/10.1029/2006GL026462>

6. Фролов В.Л. // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 2. С. 25–48. <https://doi.org/10.12737/10383>
7. Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2017. 468 с.
8. Гуревич А.В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200711a.1145>
9. Streltsov A. V., Berthelier J.-J., Chernyshov A. A., et al. // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. Art. no. 118. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>
10. Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545–576.
11. Sauvaud J. A., Moreau T., Maggiolo R., et al. // Planet. Space Sci. 2006. V. 54, No. 5. P. 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.10.019>
12. Planetary and Space Science. First results of the DEMETER micro-satellite (special issue) / ed. by M. Parrot. 2006. V. 54, No. 5. P. 409–557.
13. Гальперин Ю.И., Пономарев Ю.Н., Синицин В.М. Некоторые алгоритмы расчёта справочной геофизической информации вдоль орбит околоземных спутников. Программа КАДР-2: препринт ПР-544. М. : ИКИ АН СССР, 1980.
14. Inan U. S., Bell T. F., Helliwell R. A. // J. Geophys Res. 1978. V. 83, No. A7. P. 3 235–3 253. <https://doi.org/10.1029/JA083iA07p03235>
15. Inan U. S., Bell T. F., Bortnik J., Albert J. M. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, No. A5. Art. no. 1 186. <https://doi.org/10.1029/2002JA009580>
16. Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю. Альфвеновские мазеры. Горький : ИПФ АН СССР, 1986. 190 с.
17. Vas'kov V. V., Bud'ko N. I., Kapustina O. V., et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 1998. V. 60, No. 12. P. 1 261–1 274. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(98\)00054-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(98)00054-6)
18. Vartanyan A., Milikh G. M., Eliasson B., et al. // Radio Sci. 2016. V. 51, No. 7. P. 1 188–1 198. <https://doi.org/10.1002/2015RS005892>
19. Борисов Н. Д. // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. / ред. В.Д. Кузнецов. М. : ИЗМИРАН, 2015. С. 138–149.

Поступила в редакцию 11 ноября 2019 г.; принята в печать 16 апреля 2020 г.

ARTIFICIAL PRECIPITATION OF ENERGETIC ELECTRONS IN A MAGNETICALLY CONJUGATE REGION OF THE IONOSPHERE RELATIVE TO THE SURF FACILITY

A. O. Ryabov, V. L. Frolov, and A. D. Akchurin

We analyze the features of energetic electron precipitation (with the maximum energy $E \geq 150$ keV) from the Earth's radiation belts into a magnetically conjugate region of the ionosphere (relative to the Surf facility) during modification of the ionospheric F_2 region by high-power HF O-mode radio waves in the continuous radiation regime. Precipitation was recorded by the DEMETER satellite at an altitude of 660 km. Criteria were determined when artificial precipitation was observed, and it was found that the precipitation area is stretched along the geomagnetic meridian at a distance of up to 2200 km. The size of the area in the transverse direction exceeds 500 km. Comparison between the nature of precipitation in the magnetically conjugate region and precipitation directly in the region disturbed by high-power HF radio waves of the Surf facility is performed.