АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК, 2011, том 45, № 1, с. 5–31

УДК 550.388.2; 523.985.3

ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА МИКРОСПУТНИКАХ УНИВЕРСИТЕТСКИЙ–ТАТЬЯНА И УНИВЕРСИТЕТСКИЙ–ТАТЬЯНА-2

© 2011 г. В. А. Садовничий[1], М. И. Панасюк[2], И. В. Яшин[2], В. О. Баринова[2], Н. Н. Веденькин[2], Н. А. Власова[2], Г. К. Гарипов[2], О. Р. Григорян[2], Т. А. Иванова[2], В. В. Калегаев[2], П. А. Климов[2], А. С. Ковтюх[2], С. А. Красоткин[2], Н. В. Кузнецов[2], С. Н. Кузнецов[2], Е. А. Муравьева[2], И. Н. Мягкова[2], Р. А. Ныммик[2], Н. Н. Павлов[2], Д. А. Парунакян[2], А. Н. Петров[2], В. Л. Петров[2], М. В. Подзолко[2], В. В. Радченко[2], С. Я. Рейзман[2], И. А. Рубинштейн[2], М. О. Рязанцева[2], Е. А. Сигаева[2], Э. Н. Сосновец[2], Л. И. Старостин[2], В. И. Тулупов[2], Б. А. Хренов[2], В. М. Шахпаронов[2], А. В. Широков[2], С. Ю. Бобровников[1], В. В. Александров[1], С. С. Лемак[1], В. С. Морозенко[3], В. М. Журавлев[4], Е. А. Мареев[5], В. Н. Блинов[6], Н. Н. Иванов[6], В. А. Кожевников[7], Л. А. Макриденко[7], В. М. Краснопеев[8], А. П. Папков[8], Дж. Ли[9], И. Пак[9], Х. Коцоми[10], О. Мартинес[10], Э. Понсе[10], У. Салазар[10]

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2]Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московского государственного университета, Москва, Россия
[3]Костромской государственный университет, Кострома, Россия
[4]Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия
[5]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
[6]ПО “ПОЛЕТ” – филиал ФГУП “ГКНПЦ им. М.В. Хруничева”, Омск, Россия
[7]ФГУП “НПП ВНИИЭМ”, Москва, Россия
[8]Научно-исследовательская лаборатория аэрокосмической техники, Калуга, Россия
[9]Университет EWHA, Сеул, Республика Корея
[10]Университет BUAP, Пуэбла, Мексика

Поступила в редакцию 02.06.2010 г.

Представлены первые результаты реализации программы создания малых университетских спутников, разработанной в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова: исследование космической среды на борту двух научно-образовательных микроспутников МГУ Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2. Описаны комплексы научной аппаратуры, предназначенные для изучения заряженных частиц в околоземном космическом пространстве и излучений атмосферы в ультрафиолетовом и красном-инфракрасном оптических диапазонах длин волн. Представлены результаты исследований динамики потоков заряженных частиц на орбитах микроспутников и особенностей проникновения протонов СКЛ во время геомагнитных возмущений. Рассмотрены экспериментальные данные о вспышках ультрафиолетового и красного-инфракрасного излучений – транзиентных световых явлениях в верхней атмосфере. Приведены результаты космической образовательной программы МГУ, созданной на базе проектов Университетский–Татьяна.

ВВЕДЕНИЕ

В МГУ разработана программа создания малых университетских спутников, позволившая привлекать студентов, аспирантов и молодых сотрудников к космическому эксперименту с первых этапов планирования и до осмысления полученных экспериментальных результатов. Реализация программы начата успешными запусками двух научно-образовательных микроспутников МГУ Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2. Основными целями программы экспериментальных исследований на этих ИСЗ было изучение влияния солнечной и геомагнитной активности на радиационную обстановку в магнитосфере, а также изучение свечений в атмосфере Земли.

В преддверии 250-летия Московского государственного университета, 20.01.2005, с космодрома “Плесецк” была успешно запущена ракета-носитель (РН) Космос-3М, оснащенная головным аэродинамическим обтекателем с увеличенной зоной полезного груза, с двумя спутниками на борту. На расчетную орбиту были выведены основной спутник МО РФ и попутный микроспутник (микрокосмический аппарат – МКА) Университетский–

Татьяна, изготовленные в КБ “Полет” производственного объединения “Полет” (г. Омск). Работы по созданию бортового комплекса управления МКА выполнены с участием НИЛАКТ РОСТО (г. Калуга). Научная аппаратура для МКА была разработана и изготовлена в НИИЯФ МГУ (г. Москва).

МКА Университетский–Татьяна создан КБ “Полет” за рекордно короткий срок: практические работы по сборке МКА были начаты 01.12. 2004, а уже 12.01.2005 полностью собранный и испытанный МКА был доставлен из Омска на космодром “Плесецк”.

Кроме решения научных задач, МКА Университетский–Татьяна был предназначен для решения ряда прикладных задач, в том числе:

• исследования влияния факторов космического пространства на бортовую радиоэлектронную аппаратуру;

• оперативной доставки измерительной информации с борта на наземный приемный комплекс;

• экспериментальной отработки технологий использования навигационной аппаратуры потребителей КНС ГЛОНАСС на космических аппаратах;

• экспериментальной отработки малогабаритных бортовых служебных систем МКА: системы электропитания с использованием солнечных панелей трех типов, многофункционального бортового комплекса управления, системы ориентации и стабилизации с двигателем-маховиком.

МКА Университетский–Татьяна успешно функционировал больше 2 лет, вместо запланированных 6 месяцев (Садовничий и др., 2007). В процессе эксплуатации МКА выявлены особенности его поведения на орбите и отработана технология управления полетом. Система электропитания и связанная с ней система термостабилизации МКА показали высокую надежность и стабильность в работе. В то же время оказалось, что экспериментальная солнечная батарея из аморфного кремния, установленная на спутнике наряду с другими, обладает существенным нескомпенсированным магнитным моментом, что внесло некоторые искажения в работу магнитометров и дестабилизировало систему ориентации и стабилизации КА. Тем не менее алгоритм блока управления системой ориентации и стабилизации позволил стабилизировать МКА по показаниям солнечных датчиков.

С проекта Университетский–Татьяна началось экспериментальное изучение в нашей стране интересных транзиентных явлений – очень быстрых вспышек света в ультрафиолетовом диапазоне в верхней атмосфере Земли. Природа таких явлений составляет в настоящее время предмет научных дискуссий. Основная задача МКА Университетский–Татьяна-2 состояла как раз в изучении транзиентных явлений, взаимодействия атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли.

Второй научно-образовательный МКА МГУ – Университетский–Татьяна-2 был запущен 17.09.2009 с космодрома “Байконур” при помощи РН Союз-2.1Б с использованием разгонного блока Фрегат.

Система ориентации является критически важной для функционирования МКА. На МКА Университетский–Татьяна-2 бортовая система ориентации и стабилизации активного электромаховичного типа была разработана и отлажена ФГУП “НПП ВНИИЭМ” совместно с кафедрой прикладной механики и управления механико-математического факультета МГУ. Работы по подготовке эксперимента на МКА Университетский–Татьяна-2 выполнялись коллаборацией университетов и институтов России, Кореи и Мексики.

Научная аппаратура МКА Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2 состояла из детекторов двух типов: детекторы заряженных частиц для регистрации непосредственно на орбите и детекторы ультрафиолетового и красного-инфракрасного излучений, регистрируемых в поле зрения, в направлении на Землю. Аппаратура спутников, запущенных на полярную орбиту, может регистрировать потоки заряженных частиц практически из всех основных структурных областей магнитосферы Земли: радиационных поясов, авроральной зоны, высокоширотных полярных шапок. Это дает возможность проводить фундаментальные и прикладные исследования глобальных явлений, охватывающих всю магнитосферу и проявляющихся в областях, существенно различающихся по своим свойствам. К таким явлениям относятся, в частности, магнитные бури, которые являются откликом магнитосферы на взрывные процессы, происходящие на поверхности Солнца. Магнитные бури связаны с интенсивным энерговыделением в магнитосфере и в ионосфере и являются главным объектом исследований при прогнозировании состояния космической среды, которое в последнее время принято называть термином “космическая погода”.

Впервые на основе экспериментальной информации с первого университетского МКА Университетский–Татьяна разработана уникальная космическая образовательная программа для студентов ВУЗов России (Космический практикум, 2005, 2006). Научная информация с борта МКА Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2, полученная на пункте приема космической информации, созданном на территории МГУ, обрабатывалась и выставлялась для свободного использования университетским сообществом на сайтах http://cosmos.msu.ru и http://space.msu.ru. Для осуществления дистанционного обучения создан мощный Интернет-узел, обеспечивающий информационный трафик: http://smdc.sinp.msu.ru/. В результате, студенты и аспиранты МГУ и сотрудничающих с МГУ университетов и других учебных заведений могут

Таблица 1. Данные о МКА Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2

ИСЗ	Период функционирования	Полная масса/ масса активной нагрузки, кг	Габаритные размеры, мм	Потребление энергии, Вт	Тип орбит	Период обращения, мин	Высота, км	Наклонение, град
Университетский–Татьяна	20.01.2005–07.03.2007	31.6/7.2	310 × 310 × 525	≤4.6	Круговая полярная	~105	~950	~83
Университетский–Татьяна-2	17.09.2009–20.01.2010	90/20	950 × 650 × 550	<25	Солнечно-синхронная полярная	~ 101.3	815–850	98.8

выполнять курсовые и дипломные работы на основе научной информации, получаемой с МКА МГУ.

НАУЧНАЯ АППАРАТУРА

Данные о МКА Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2 и о параметрах орбит, на которых функционировали МКА, приведены в табл. 1. Ось МКА была ориентирована по радиусу-вектору “спутник–Земля”.

Университетский–Татьяна

Научная аппаратура МКА Университетский–Татьяна была предназначена для исследования пространственно-временнóго распределения потоков электронов с энергией $E_e > 40$ кэВ и протонов с энергией $E_p > 2$ МэВ и УФ-излучения и конструктивно состояла из шести блоков детектирования БД1–БД4, БА, ДУФ (детектор УФ-излучения) и информационного блока БИ (рис. 1). Состав и основные характеристики детекторных упаковок и измеряемых параметров приведены в табл. 2 (подробное описание аппаратуры см. (Космический практикум, 2005; 2006), а также http://cosmos.msu.ru/, http://smdc.sinp.msu.ru/).

Регистрация заряженных частиц. Для регистрации заряженных частиц различных типов и энергий на МКА Университетский–Татьяна был выбран следующий состав детекторов: три полупроводниковых детектора, два сцинтилляционных, два газоразрядных, один электростатический анализатор (см. табл. 2). Такой комплект детекторов обеспечивал регистрацию электронов и протонов с энергиями от десятков кэВ до сотен МэВ (Власова и др., 1999; Балашов и др., 2003).

Следует отметить, что в связи с ограниченными массо-габаритными характеристиками аппаратуры некоторые детекторы имели недостаточную пассивную защиту. Поэтому на отдельных участках орбиты спутника электронные каналы присчитывали потоки протонов, а протонные каналы – электронов. Например, во внутреннем радиационном поясе (РП) и в полярной шапке (ПШ) электронные каналы регистрировали в основном энергичные протоны, а в пограничной области – между РП и ПШ – протонные каналы могли регистрировать потоки электронов. Ввиду этого показания некоторых каналов детекторов на таких участках требуют дополнительного методического анализа [http://cosmos.msu.ru].

Регистрация ультрафиолетового излучения. На борту МКА Университетский–Татьяна был установлен детектор ультрафиолетового излучения (ДУФ) (Гарипов и др., 2006), предназначенный для изучения оптических вспышек, измерения фона свечения атмосферы в УФ-диапазоне длин волн 300–400 нм, и детектор фонового излучения, вызываемого заряженными частицами в оптических элементах детектора.

Полярная круговая орбита спутника позволяет проводить исследования практически в любой географической точке Земли, а рабочий диапазон чувствительности детектора (300–400 нм) – проводить измерения во всем диапазоне излучения атмосферы. Регистрация начинается на ночной стороне, когда спутник входит в тень Земли и уровень свечения

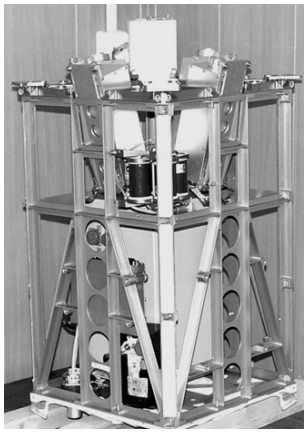

Рис. 1. Научная аппаратура на МКА Университетский–Татьяна. БД1–БД4, БА установлены на верхней поверхности платформы таким образом, что апертурная ось БД1–БД4 составляет 15° с направлением от Земли, а ось БА направлена от Земли. ДУФ установлен на нижней поверхности платформы так, что апертурная ось направлена на Землю.

Таблица 2. Научная аппаратура МКА Университетский–Татьяна. Состав детекторов и измеряемых параметров

№ п/п	Блок	Тип детекторов и поле зрения детекторного узла	Защита входного окна	Энергии регистрируемых частиц	Параметр	Геометрический фактор G, см^2 ср	Примечание (боковая защита и энергии частиц)
1	БД1	СБТ-9 30°	10 мкм Al	$E_e > 40$ кэВ $E_p > 1$ МэВ	П1	4×10^{-4}	1 мм Al + 3 мм Pb $E_p > 40$ МэВ $E_e > 5$ МэВ
2	БД1	СБМ-20 360°	1 мм Al + 3 мм Pb	$E_e > 5$ МэВ $E_p > 40$ МэВ	П2	54	
3	БД2	ППД 300 мкм Si (одиночный) 50°	10 мкм Al	$E_e \geq 70$ кэВ $E_p > 0.8$ МэВ; $E_p = 2.2$–14 МэВ $E_p = 1$–100 МэВ	П3 П4 П5	9.7×10^{-2}	7 мм латунь $E_p > 70$ МэВ $E_e > 10$ МэВ
4	БД3	ППД 300 мкм Si 50°	300 мкм Al	$E_e = 0.3$–0.6 МэВ $E_p > 7$ МэВ $E_p = 7$–15 МэВ	П6 П7	9.7×10^{-2}	~7 мм латунь $E_p > 70$ МэВ $E_e > 10$ МэВ
5	БД3	ППД 1000 мкм Si 50°	~1 мм Al	$E_e = 0.6$–0.8 МэВ $E_p = 15$–40 МэВ	П8 П9	2×10^{-2}	7 мм латунь $E_p > 70$ МэВ $E_e > 10$ МэВ
6	БД4	СЦ-1 CsJ(Tl) 15 × 20 мм 180°	~2 мм Al	$E_e > 3.5$ МэВ $E_p > 20$ МэВ $E_e > 11$ МэВ $E_p = 23$–1000 МэВ $E_p = 40$–100 МэВ	П10 П11 П12	36 36 32	
7	БД4	СЦ-2 CsJ(Tl) 15 × 20 мм 180°	~7 мм Al + 3 мм Pb	$E_e > 18$ МэВ $E_p > 60$ МэВ $E_\alpha = 240$–600 МэВ	П13 П14	36 36	
8	БА	ЭСА (ВЭУ) 10° × 10°		$E_e \approx 1$ кэВ	П15	3×10^{-5} см^2 ср кэВ	~3 мм Al
9	ДУФ	ФЭУ 14°		Ультрафиолет $\lambda = 300$–400 нм		0.024 см^2 ср	

опускается ниже заданного уровня, и продолжается до выхода спутника из тени. При наблюдении в надир (в сторону Земли) прозрачность атмосферы и ионосферы в области длин волн 300–400 нм высока, что позволяет проводить изучение флуоресцентного свечения с высокой эффективностью. Данные измерений свечения атмосферы и локального свечения, вызванного заряженными частицами в оптических элементах детектора, в виде осциллограмм длительностью, равной длительности теневого участка орбиты, передавали на Землю. Система обнаружения вспышек света отбирает вспышки длительностью от сотен микросекунд до десятков миллисекунд. Канал передачи данных на Землю позволяет передать за виток спутника осциллограммы двух наиболее мощных событий вспышек длительностью 4 и 64 мс по 256 точек каждая.

Приемниками излучения являются два ФЭУ с увиолевым входным окном и мультищелочным фотокатодом. Один из ФЭУ предназначен для изучения оптического излучения, другой – для регистрации света, возникающего в стеклянных элементах детектора при прохождении заряженных частиц. Поле зрения первого ФЭУ, которое формируется с помощью многоканального коллиматора, ориентировано в надир с углом обзора ~14°. Полученные на орбите данные за период более двух лет работы МКА Университетский–Татьяна показали устойчивую работу электроники и ФЭУ детектора при негерметичном исполнении и с пассивной стабилизацией температуры. Стабильность работы фотосенсоров была обеспечена благодаря выбору ФЭУ с мультищелочным фотокатодом (Гарипов и др., 2005а) и цифровой регулировкой усиления ФЭУ. Фоновое излучение света от заряженных частиц в оптических элементах детектора оказалось пренебрежимо мало в сравнении со свечением атмосферы даже в самые темные ночи. Показано также, что эффект “послесвечения” выбранного ФЭУ при наблюдении вспышек мал по сравнению с уровнем свечения атмосферы. Экспериментально подтверждена возможность работы ФЭУ с регулируемым напряжением высоковольтного питания в режиме перехода от большой освещенности на дневной стороне Земли к малой освещенности – на ночной. В измерениях интенсивности УФ-излучения одним детектором достигнут широкий динамический диапазон ~10^5.

Данные о числе фотонов, приходящих в апертуру детектора, записываются как значения двух кодов:

1) код *M* напряжения на ФЭУ, который определяет коэффициент усиления ФЭУ (отношение заряда сигнала на аноде к числу фотоэлектронов на катоде ФЭУ);

2) код *N* значения АЦП в каждом шаге временной развертки осциллографа.

По значению кода *M* вычисляется усиление ФЭУ, а по значению второго кода *N*, которое соответствует цифровому значению амплитуды сигнала, поступающего на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), при известном усилении ФЭУ определяется число фотоэлектронов, образованное на катоде ФЭУ за шаг измерения.

Уровень значений кода *N*, который подобран в качестве "среднего" и к которому приводит автоматическая регулировка усиления, составляет 128.

На МКА Университетский–Татьяна интенсивность УФ-излучения атмосферы измеряется каждые 4 с.

При наблюдении временнóго профиля вспышек использовались два варианта "цифрового осциллографа":

1) с длительностью развертки 4 мс и шагом 16 мкс;

2) с длительностью развертки 64 мс и шагом 256 мкс.

В обоих случаях число шагов равно 256, а интегрирование в пределах одного шага проводилось цифровым путем (АЦП работает с шагом 2 мкс). Отбор вспышек в обоих вариантах цифрового осциллографа осуществлялся по условию "самая яркая вспышка за период наблюдения на ночной части витка спутника". Вспышки с энергией УФ-излучения в атмосфере порядка десятков кДж регистрировались в линейном режиме. В более ярких вспышках (с энергией до единиц МДж) максимальные значения амплитуды попадают в область насыщения АЦП, и энергия вспышки оценивалась по длительности вспышки на уровне насыщения (Гарипов и др., 2010).

Основным результатом исследования УФ-излучения атмосферы стало получение распределения на карте Земли вспышек УФ-излучения в миллисекундном диапазоне (транзиентов). Было показано, что транзиенты концентрируются в приэкваториальном районе Земли (от 30° северной до 30° южной широты). Временны́е и энергетические характеристики регистрируемых событий близки к характеристикам транзиентов, связанных с электрическими разрядами в верхней атмосфере, наблюдавшимися ранее. Следующий эксперимент на борту МКА МГУ Университетский–Татьяна-2 был направлен на изучение световых транзиентов в атмосфере. На его борту установлен более сложный комплекс приборов, который позволял расширить наши представления об этом атмосферном явлении.

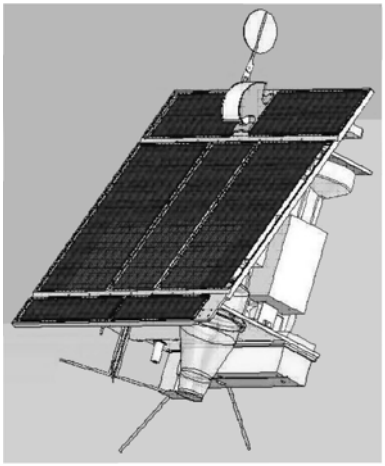

Рис. 2. Научная аппаратура на МКА Университетский–Татьяна-2. Спутник не прямоугольный. Солнечная батарея установлена под углом. При такой ориентации батареи достигается максимум в эффективности энергоснабжения и максимальная площадь в нижней части спутника для установки научных приборов.

Университетский–Татьяна-2

МКА Университетский–Татьяна-2 был предназначен для исследования транзиентных разрядов в УФ- и ИК-оптических диапазонах длин волн и поиска корреляции этих разрядов с потоками заряженных частиц (Веденькин и др., 2010; Garipov и др., JGR 2010). Данные орбитальных детекторов позволяли изучать взаимодействие атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли. Научная аппаратура конструктивно состояла из трех блоков детектирования (БД): ДУФиК (детектор ультрафиолетового и красного излучений), ФЗК (детектор флуктуаций потока заряженных частиц), МТЕЛ (телескоп на основе микро-электро-механической кремниевой технологии); и информационного блока БИ (рис. 2). Состав и основные характеристики детекторных упаковок и измеряемых параметров приведены в табл. 3.

Детектор ультрафиолетового и красного излучения (ДУФиК). В ДУФиК используются те же ФЭУ типа Hamamatsu R1463, что и в ДУФ МКА Университетский–Татьяна. Полоса пропускания окна ФЭУ ограничена светофильтрами УФС1 (240–400 нм) и КС11 (610–800 нм) толщиной 2 мм. Поле зрения каждого из детекторов определено коллиматором из отверстий диаметром 0.8 мм и высотой 2.2 м, оптическая ось которого ориентирована в надир, диаметр обозреваемой площади атмосферы 230 км.

Измерение интенсивности излучения в обоих диапазонах длин волн проводилось по алгоритму,

Таблица 3. Научная аппаратура МКА Университетский–Татьяна-2. Состав детекторов и измеряемых параметров

№ п/п	Блок детекторов	Тип детекторов	Поле зрения детекторного узла	Рабочие диапазоны длин волн, нм	Объем телеметрической информации, Мб/сутки
1	ДУФиК	ФЭУ	20°	240–400 610–800	1.5
2	ФЗК	СЦ 350 см^2	см. текст	Электроны с $E > 1$ МэВ	1.5
3	МТЕЛ	Телескоп *T*: ФЭУ	2 окна по 14°	300–400	50
		Спектрометр *C*: ФЭУ	14°	300–900	4

принятому выше для детектора МКА Университетский–Татьяна. Уровень “среднего” значения кода N на втором спутнике подобран как $N = 16$.

Интенсивность излучения измерялась в широком диапазоне благодаря применению обратной связи между усилением ФЭУ и интенсивностью излучения (время установления режима авторегулировки – 1 с). Применялись два режима измерения: мониторинг свечения атмосферы с шагом 1 мин и измерение вспышек излучения. Электроника измерения временно́го профиля сигналов аналогична электронике, примененной в приборе на МКА Университетский–Татьяна. В аналоговой части электроники время интегрирования 30 мкс. В цифровой части применялись временны́е шаги с переменным временем интегрирования. Вспышки излучения измерялись с шагом 1 мс и числом шагов развертки цифрового осциллографа 128. Система отбора вспышек выбирала самую яркую вспышку за период 1 мин. В системе отбора интегрирующее время составляло 1 мс.

Детектор флуктуаций потока заряженных частиц (ФЗК). Детектор заряженных частиц, приходящих из полусферы в направлении в надир, выполнен из сцинтилляционной пластины толщиной 5 мм и площадью 350 см^2, световой сигнал с которой регистрируется с помощью ФЭУ того же типа, что в ДУФиК. Электроника аналогична ДУФиК. Пороговая энергия (~1 МэВ) для электронов, приходящих из выбранной полусферы, задана алюминиевым фильтром толщиной 1 мм. Частицы, приходящие из противоположной полусферы, встречают значительно большее количество вещества спутника и имеют более высокий энергетический порог. Детектор, с одной стороны, измеряет поток электронов в режиме мониторинга и, с другой стороны, измеряет всплески потока заряженных частиц (электронов). Так же, как и в ДУФиК, для измерений в широком диапазоне интенсивности потока заряженных частиц применяется обратная связь между усилением ФЭУ и потоком электронов со временем установления режима связи 1 с. Управление сцинтилляционным детектором выполняется событиями, отобранными электроникой ДУФиК.

На МКА Университетский–Татьяна-2 вспышки регистрировались по условию “самая яркая вспышка УФ-излучения длительностью 1 мс за период наблюдения в течение одной минуты”. При выполнении этого условия проводились измерения временны́х профилей излучения в УФ- и ИК-диапазонах длин волн и потока электронов на орбите. В таком режиме имелась возможность изучать распределение вспышек не только по географической широте, но и по меридиану. Измерения в двух диапазонах длин волн позволяли получить характеристику спектра излучения (отношение интенсивности УФ- и ИК-излучений) для каждой вспышки. Детектор заряженных частиц с большой площадью был предназначен для экспериментальной проверки гипотезы о выходе электронов, ускоренных в атмосферном электрическом разряде, на высоты спутника. Так же, как в предыдущем эксперименте, детекторы были предназначены для измерений в широком диапазоне фона свечения атмосферы: от малого фона свечения на ночной, неосвещенной Луной стороне Земли до высокого фона при освещении атмосферы полной Луной, а также в районах овала полярных сияний и при выходе спутника на дневную сторону Земли.

Прибор МТЕЛ на основе микро-электро-механической кремниевой технологии (МЭК). Прибор МТЕЛ для изучения транзиентных явлений состоял из двух основных частей: телескопа *T* (рис. 3) и спектрометра *C*.

Телескоп *T* создан на основе МЭК технологии. Телескоп работает в диапазоне УФ-излучения (длины волн 300–400 нм) с полем зрения 14°. Используются два фотоприемника, 64-анодные ФЭУ с размером ячейки входного катода 2.5 × 2.5 мм, принимающие сигнал от зеркальца с тем же размером, расположенного на “фокусном” расстоянии f от катода ФЭУ. В первом телескопе $f = 9$ см и изображение объекта в атмосфере на расстоянии 800 км измеряется с шагом в атмосфере 20 км в квадрате 160 × 160 км. С помощью этого телескопа можно наблюдать вспышки с большим поперечным размером (диаметр – несколько сот км). Для наблюдения вспышек меньшего размера служит второй телескоп с фокусным расстоянием $f = 36$ см, у которого

шаг измерения изображения объекта в атмосфере 5 км. Чтобы получить для второго телескопа столь же большое поле зрения (14°), зеркальце второго телескопа сделано подвижным и управляемым по технологии МЭК. Обнаруженный сигнал в первом телескопе позволяет определить угол, на который нужно повернуть зеркальце второго телескопа, чтобы изображение можно было рассмотреть с малым шагом. Более подробно принцип действия такого комбинированного телескопа изложен в работе (Park и др., 2008). По оценке (Park и др., 2008) подробное изображение свечения разряда во втором телескопе можно получить для вспышек с числом УФ-фотонов в атмосфере более 10^{21}.

Спектрометр *C* использует возможность наблюдения потока фотонов на многоанодном ФЭУ через 8 фильтров, покрывающих 1/8 часть катода 64-анодного ФЭУ. Канал спектрометра имеет поле зрения 14°, образуемое входным окном с диаметром 4 мм, покрытым фильтром, находящимся на расстоянии 14 мм от катода ФЭУ. Каждый фильтр открывает окно с длинами волн в диапазоне около 100 нм, спектрометр перекрывает полный диапазон длин волн 300–900 нм. Эффективность регистрации фотонов с различной длиной волны определяется спектральной чувствительностью фотокатода ФЭУ и калибруется в лаборатории до проведения опыта. Электроника отбора и регистрации сигнала в каждом канале спектрометра аналогична электронике ДУФиК.

Подробное описание научной аппаратуры МКА Университетский–Татьяна-2 приведено в (Garipov и др., 2010), а также на http://space.msu.ru.

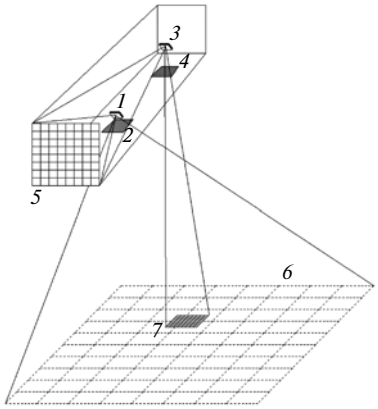

Рис. 3. Схема работы телескопа *T* прибора МТЕЛ для регистрации изображения вспышки в ультрафиолетовом диапазоне длин волн: *1* – микроэлектромеханическое зеркало широкоугольной оптической системы поиска и определения координат вспышки; *2*, *4* – входное окно телескопа, ультрафиолетовый светофильтр типа УФС-1; *3* – микроэлектромеханическое зеркало оптической системы высокого разрешения изображения вспышки; *5* – высокочувствительный фотосенсор, многоанодный ФЭУ; *6* – область обзора атмосферы при поиске вспышки; *7* – область регистрации изображения вспышки с помощью системы высокого разрешения.

НАЗЕМНЫЙ СЕГМЕНТ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для управления и приема служебной телеметрической и научной информации с борта МКА Университетский–Татьяна в НИИЯФ МГУ была создана наземная станция, которая обеспечивает прием научной информации с малых ИСЗ и с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Скорость приема составляет 9600 бит/с в диапазоне 70 см и скорость передачи управляющей информации на борт КА – 2400 бит/с в диапазоне 2 м. В состав антенного поста входят: две антенны типа волновой канал с круговой поляризацией, поворотное устройство и малошумящие антенные усилители. Для приема научной телеметрии с борта МКА Университетский–Татьяна-2 была построена специальная приемная станция в диапазоне 1.7 ГГц, которая обеспечивает прием информации со скоростью 665.4 Кбит/с.

Управляющее программное обеспечение выполняет баллистические расчеты траектории КА, управление приемопередатчиком с учетом доплеровского сдвига частоты, передачу полетного задания, прием и хранение научной и служебной телеметрии, а также отображение текущего положения КА. Научная телеметрия с МКА Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2 поступала на пункты приема, расположенные в НИИЯФ МГУ (г. Москва) и в НИЛАКТ РОСТО (г. Калуга).

Разработка систем хранения космической информации является необходимым элементом при планировании космических экспериментов. Для хранения принимаемой с МКА Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2 информации, а также информации, полученной в ходе выполненных ранее космических экспериментов, в НИИЯФ МГУ был создан Центр данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ). Для эффективной работы с данными разработано уникальное программное обеспечение, созданы информационные ресурсы, реализующие открытый доступ к получаемой информации через Интернет-портал Центра: http://smdc.sinp.msu.ru. В состав информационного обеспечения входят: системы загрузки и дешифровки научной телеметрии; система загрузки параметров и расчета орбиты спутника; система загрузки и доступа к данным в БД Oracle; система визуализации данных; средства доступа к данным через Интернет-браузер с использованием Web-форм и системы “реального времени” для анализа радиационного состояния космического пространства.

Для обработки данных МКА Университетский–Татьяна-2 была реализована уникальная, полно-

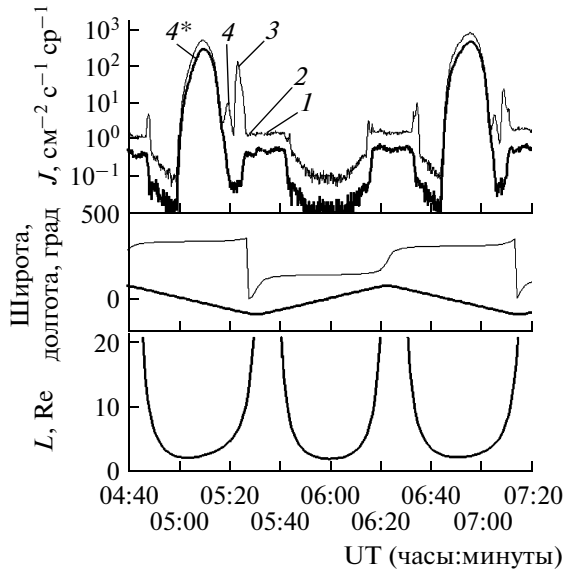

Рис. 4. Временнóй ход потоков электронов с $E > 3.5$ МэВ (тонкая кривая на верхней панели) и протонов с $E = 40–100$ МэВ (полужирная кривая) по данным МКА Университетский–Татьяна (*4** – область радиационной аномалии – Южно-Атлантическая аномалия).

стью автоматизированная система обработки и хранения данных измерений потоков заряженных частиц и свечений атмосферы, зарегистрированных на спутнике. Первичные данные с космического аппарата после сеанса связи автоматически поступали на сервер в НИИЯФ МГУ, где немедленно запускалась программа дешифровки. Обработанный файл с данными измерений размещался на FTP-сервере Центра данных оперативного космического мониторинга НИИЯФ. Одновременно загружались текущие файлы с параметрами орбиты спутника (файлы tle). В автоматическом режиме происходил расчет траектории спутника: вычислялись геодезические, географические координаты, солнечно-магнитные координаты и координаты Мак-Илвайна (L-B). Данные измерений и координаты спутника загружались в базу данных под управлением СУБД Oracle. Текущие измерения потоков частиц, зарегистрированных прибором, размещались на главной странице портала ЦДОКМ НИИЯФ на графиках для предварительного ознакомления в разделе “Космическая погода”.

На данный момент в базу данных в автоматическом режиме загружены все данные измерений МКА Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2. Для доступа к данным созданы Web-формы, размещенные на Интернет-портале Центра данных. Для получения информации необходимо выбрать формат представления (таблица на экране, графический файл, текстовый файл), указать интервал времени и нужные каналы. Пользователь заполняет поля Web-формы, после чего сервер на основе введенной информации генерирует SQL-запрос к базе данных Oracle. Графические изображения строятся с использованием пакета графических программ QLOOK, также разработанного в НИИЯФ МГУ.

Данные регистрации МКА Университетский–Татьяна-2 потоков заряженных частиц и транзиентных световых явлений в верхней атмосфере были доступны в реальном масштабе времени через Интернет и позволяли осуществлять оперативный мониторинг состояния околоземного космического пространства на базе современных информационных технологий.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Специальная мониторинговая аппаратура на борту МКА Университетский–Татьяна была предназначена для изучения влияния солнечной и геомагнитной активности на радиационную обстановку в магнитосфере Земли. Программа исследований разработана, исходя из предположения, что основным фактором, определяющим “космическую погоду” и, в том числе, радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве, является солнечная активность.

Солнечная активность двояким образом влияет на радиационную обстановку: непосредственно через потоки энергичных частиц (в основном протонов), приходящих на Землю после солнечных вспышек, и через развитие в магнитосфере геомагнитных возмущений (магнитных бурь). Во время геомагнитных возмущений генерируются мощные потоки энергичных частиц за счет внутримагнитосферных ускорительных процессов, одним из проявлений которых является образование радиационных поясов Земли. Несмотря на общую генетическую связь всех геофизических явлений с солнечной активностью, конкретные магнитно-плазменные процессы, протекающие в различных областях магнитосферы, оказываются различными. Это позволяет выделить в околоземном космическом пространстве, заполненном регулярным магнитным полем, четыре области: (1) – полярные шапки, (2) – авроральная зона, (3) – внешний и (4) – внутренний радиационные пояса. Орбита МКА Университетский–Татьяна такова, что спутник регулярно пересекает все эти области, осуществляя непрерывный мониторинг радиационного состояния магнитосферы Земли (см. рис. 4). Тип частиц, их потоки и энергии существенно различаются в разных структурных образованиях магнитосферы и испытывают значительные вариации в зависимости от уровня гелио-геофизической активности.

Радиационная обстановка в 2005–2010 годах

Функционирование МКА Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2 пришлось на

период спада 23-го цикла солнечной активности (СА) и необычно затянувшегося минимума. На рис. 5 приведены данные о солнечной активности со второй половины 23-го цикла СА – монотонно падающая кривая. Вертикальные линии – события солнечных космических лучей (СКЛ), высота которых отражает величину пиковых потоков протонов, зарегистрированных на борту МКА Университетский–Татьяна и GOES-11. Стрелками отмечены периоды функционирования микроспутников Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2.

Можно видеть, что в июле 2004 г. солнечная активность упала ниже чисел Вольфа (W), равных 40 (пунктирная горизонтальная линия на рис. 5), и начался период спокойного Солнца. Однако наблюдавшаяся с конца 2003 г. высокая частота событий СКЛ, вопреки предположению модели (Feynman и др., 1993), не прекратилась. Такую возможность предсказала другая модель потоков СКЛ, разработанная в НИИЯФ МГУ (Nymmik, 1999), согласно которой событий СКЛ, даже самых больших, можно ожидать и в годы спокойного Солнца.

Прогноз модели (Nymmik, 1999) оправдался в полной мере, когда во время полета МКА Университетский–Татьяна было зарегистрировано одиннадцать периодов с возрастаниями СКЛ, в том числе экстремально большое событие 20.01.2005 и три подряд возрастания СКЛ в декабре 2006 г.

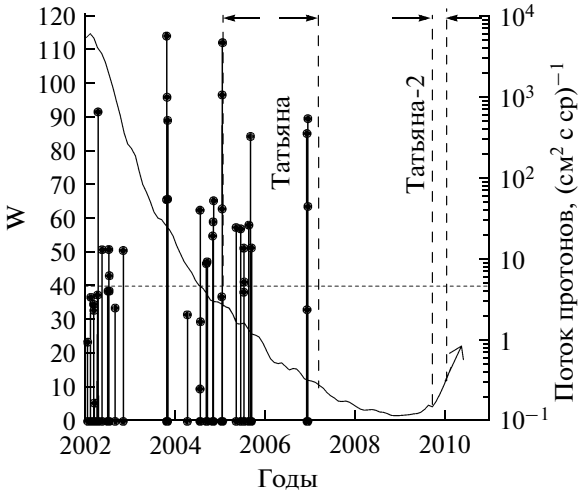

Рис. 5. Солнечная активность на спаде 23-го цикла СА и события СКЛ по данным спутников GOES-11 (Geostationary Operational Environmental Satellite) и Университетский–Татьяна (см. текст).

Динамика границ проникновения солнечных космических лучей в магнитосферу Земли во время магнитных бурь 15.05.2005 и 15.12.2006

Исследование динамики границ проникновения СКЛ в магнитосферу Земли позволяет получить ценную информацию об изменении топологии геомагнитного поля во время геомагнитных возмущений. По экспериментальным данным с МКА Университетский–Татьяна было проведено исследование двух периодов с возрастаниями СКЛ: 12–18.05.2005 (Myagkova и др., 2006) и 05–17.12.2006 (Myagkova и др., 2009). Результаты анализа динамики потоков СКЛ, условий в межпланетной среде и геомагнитной обстановки для периода 05–17.12.2006 представлены в (Власова и др., 2011). Солнечные вспышки, с которыми связывают возрастания СКЛ в эти периоды, произошли 13.05.2005 (с координатами N12 E11) и 05.12 (S07 E79) и 06.12 (S05 E64), 13.12 (S05 W23), 14.12 (S06 W46) в 2006 г. Две последние вспышки произошли в западной области Солнца, что определило характер временно́го профиля возрастания СКЛ: быстрый приход и крутой фронт (рис. 6). Временны́е профили возрастаний потоков солнечных протонов в межпланетной среде (МС) по данным измерений на ИСЗ ACE (Advanced Composition Explorer) ($E > 30$ МэВ) и внутри магнитосферы Земли в области полярных шапок (ПШ) по данным МКА Университетский–Татьяна (E = 40–100 МэВ), а также давления солнечного ветра (СВ), B_z-компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) и *Dst*-вариации представлены на рис. 6. Профили потоков СКЛ в МС и в ПШ близки к подобию. Геомагнитные бури произошли на фоне возрастания СКЛ, 15.05.2005 – примерно через 3.5 часа после прихода ударной волны, а 15.12.2006 – примерно через 10 часов. Приход ударной волны вызвал суббуревую активность до ~2000 нТл в обоих случаях. Максимальные величины давления СВ и B_z-компоненты ММП во время бури 15.05.2005 ($Dst_{\min}$ = –263 нТл) примерно вдвое превосходили соответствующие величины 15.12.2005 ($Dst_{\min}$ = –146 нТл).

По данным МКА Университетский–Татьяна был проведен анализ динамики положения границ проникновения (ГП) СКЛ в магнитосферу Земли во время геомагнитных бурь. Поскольку поток протонов на ГП спадает не мгновенно, для анализа положения ГП использовался следующий критерий: моментом прохождения ГП считалось время, когда интенсивность потока частиц становилась в два раза меньше максимальной интенсивности, то есть интенсивности в ПШ (см., например, Панасюк и др. 2004).

Исследование было проведено для утреннего и вечернего секторов магнитосферы. Вариации положения ГП солнечных протонов с энергией 2–14 и 40–100 МэВ представлены на рис. 7. Сплошной линией показана динамика амплитуды *Dst*-вариации.

Геомагнитная буря 15.05.2005. До бури ГП протонов СКЛ находилась в районе L = 5.0–5.5 и L = 4.5–5.0 для протонов с энергией 2–14 МэВ и 40–100 МэВ соответственно в обоих секторах MLT. Отметим, что после прихода ударной волны и до главной фазы бури величина B_z-компоненты варьировала около ну-

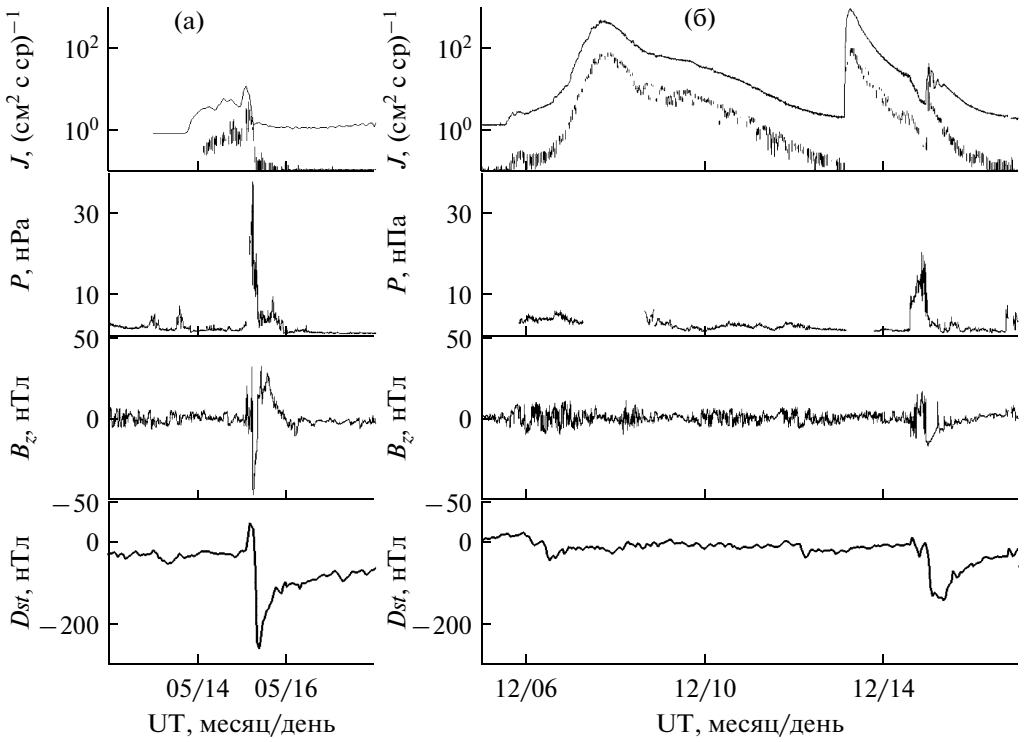

Рис. 6. Временны́е профили потоков солнечных протонов в межпланетной среде по данным ИСЗ ACE (Advanced Composition Explorer)($E > 30$ МэВ) (тонкие кривые) и внутри магнитосферы по данным МКА Университетский–Татьяна ($E = 40$–100 МэВ), давления солнечного ветра (P), B_z-компоненты ММП и Dst-вариации 12–18.05.2005 (а) и 05–17.12.2006 (б).

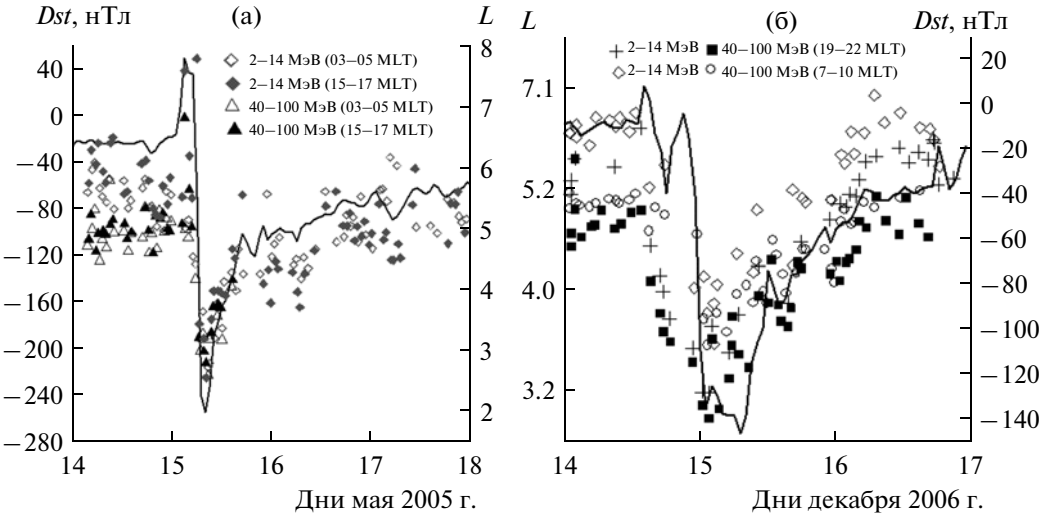

Рис. 7. Временно́й ход положения границ проникновения солнечных протонов в утреннем и вечернем секторах магнитосферы по данным МКА Университетский–Татьяна во время магнитных бурь 15.05.2005 (а) и 15.12.2006 (б) (различные значки соответствуют исследуемым диапазонам энергий – см. легенды на рис.). Сплошной линией показана динамика амплитуды Dst-вариации.

левого значения с небольшим преимуществом к положительным значениям. Временны́е профили положения ГП хорошо следуют за ходом Dst-вариации на главной фазе этой бури. Максимально низкоширотное положение ГП для обоих секторов соответствует моменту максимума амплитуды Dst-вариации и составляет $L \approx 2.5$ для протонов с энергией и 2–14 МэВ, и 40–100 МэВ. Не наблюдается существенных различий положения ГП протонов в утреннем и вечернем секторах магнитосферы, что

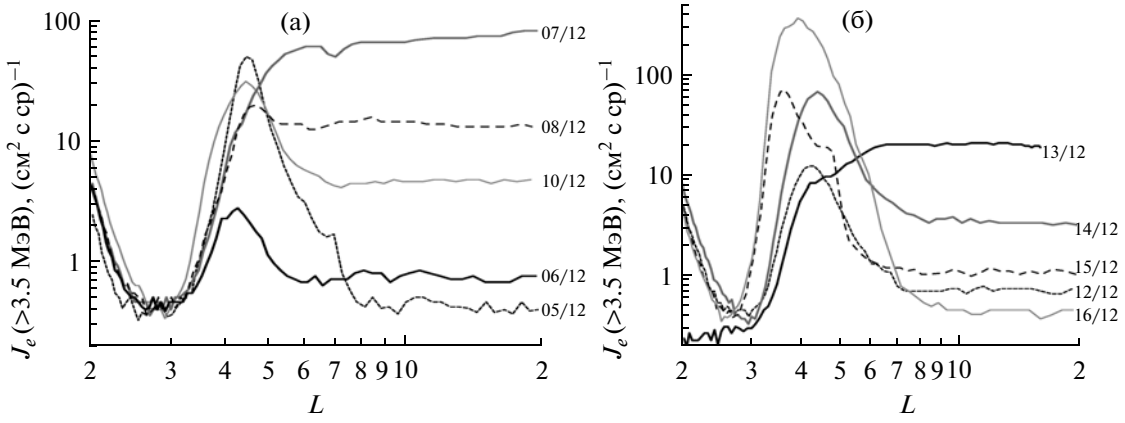

Рис. 8. Радиальные профили потоков релятивистских электронов с $E > 3.5$ МэВ по данным ИСЗ Университетский–Татьяна 05–10.12.2006 (а) и 12–16.12.2006 (б).

может быть связано с тем, что, как предполагалось в (Панасюк и др., 2004), самые глубокие уровни проникновения связаны с захватом частиц на дрейфовые орбиты.

Геомагнитная буря 15.12.2006. До бури ГП протонов СКЛ находилась в районе $L = 5.2–6.0$ и $L = 4.6–5.0$ для протонов с энергией 2–14 МэВ и 40–100 МэВ соответственно. Небольшое различие в секторах наблюдается: в вечернем секторе ГП располагается на меньших L. Временны́е профили положения ГП в вечернем секторе опережают ход *Dst*-вариации на главной фазе бури. Движение ГП в вечернем секторе началось примерно в 14 UT 14.12.2006, во время, когда наблюдался фронт ударной волны, а величина B_z-компоненты стала преимущественно отрицательной (см. рис. 6б). Движение ГП на меньшие широты замедлилось примерно в 18 UT, в это же время наблюдается поворот B_z-компоненты на север. Продолжение движения ГП на меньшие широты в вечернем секторе возобновилось примерно в 23 UT, в это время наблюдается поворот B_z-компоненты на южное направление. Временны́е профили положения ГП в утреннем секторе хорошо следуют за ходом *Dst*-вариации на главной фазе бури. Максимально низкоширотное положение ГП для обоих секторов соответствует моменту первого максимума амплитуды *Dst*-вариации и составляет $L \approx 3.2$ и $L \approx 2.9$ для протонов с энергией 2–14 МэВ и 40–100 МэВ соответственно. Несмотря на дальнейшее уменьшение величины *Dst*-вариации и отрицательную величину B_z-компоненты, ГП начинает движение к большим широтам в обоих секторах MLT. Следует отметить, что величина давления солнечного ветра к этому времени приблизилась к спокойному уровню.

Сравнительный анализ временно́го хода ГП в магнитосферу Земли солнечных протонов для двух периодов геомагнитной возмущенности показал следующее:

– ГП может следовать, но может и не следовать за изменением величины *Dst*-вариации на главной фазе геомагнитной бури;

– при различии в динамике движения ГП и величины *Dst*-вариации наблюдается корреляция динамики ГП с вращением B_z-компоненты с южного на северное направление и обратно;

– при дальнейшем уменьшении величины *Dst*-вариации, сохранении южного направления B_z-компоненты, но уменьшении величины давления СВ наблюдается движение ГП к большим широтам.

Вариации внешнего радиационного пояса релятивистских электронов 06–16.12.2006

Возрастание потоков релятивистских электронов (ПРЭ) внешнего радиационного пояса – один из важных факторов космической погоды, воздействующий на спутниковые системы и атмосферу Земли. По данным МКА Университетский–Татьяна был проведен анализ динамики ПРЭ с энергией >3.5 МэВ во время двух геомагнитных бурь 06.12.2006 ($Dst_{\min} = -77$ нТл) и 15.12.2006 ($Dst_{\min} = -146$ нТл) (Myagkova и др., 2009) (временно́й ход амплитуды *Dst*-вариации см. рис. 6б). Следует отметить, что канал научной аппаратуры для измерения потока электронов с $E_e > 3.5$ МэВ также считает поток протонов с $E_p > 20$ МэВ, поэтому во время возрастания потоков СКЛ в полярных шапках (на больших L) регистрируются, в основном, потоки протонов. Во время геомагнитных возмущений граница проникновения может сдвигаться на малые L. В области $L < 7$ протонов с $E_p > 20$ МэВ в спокойное время нет. Радиальные профили ПРЭ приведены на рис. 8. Все профили построены по данным пролетов МКА Университетский–Татьяна через идентичные области пространства.

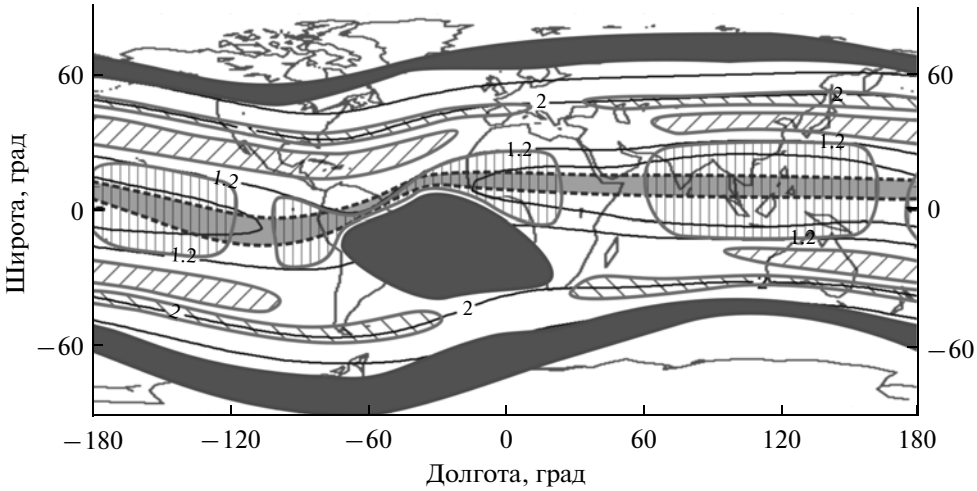

Рис. 9. Области высыпания заряженных частиц вблизи экватора на 600 км: протоны – светло-серая заливка; электроны с энергиями десятки–сотни кэВ и выше – вертикальная штриховка; электроны на низких и средних широтах – правая и левая штриховки соответственно. Темно-серая заливка – область радиационных поясов.

Известно, что в результате примерно половины геомагнитных бурь наблюдаются возрастания ПРЭ (Reeves и др., 2003). Несмотря на то, что геомагнитные бури 06.12.2006 и 15.12.2006 имели существенно разную мощность (максимальную амплитуду *Dst*-вариации) и временнóй ход, в обоих случаях наблюдались возрастания ПРЭ. Можно отметить ряд известных (см., например, Панасюк и др., 2004) особенностей, характеризующих динамику ПРЭ во время геомагнитной бури:

• уменьшение максимальной величины ПРЭ на главной фазе бури – профиль 06.12 по сравнению с профилем 05.12 (рис. 8а);

• возрастание ПРЭ на фазе восстановления бури;

• профиль 10.12 по сравнению с 06.12 (рис. 8а) и 16.12 по сравнению с 15.12 (рис. 8б);

• максимум ПРЭ располагается на $L \sim 4.3$ после бури с $Dst_{\min} = -77$ нТл – профиль 06.12 (рис. 8а) и на $L \sim 3.7$ после бури с $Dst_{\min} = -146$ нТл – профиль 15.12 (рис. 8б), что прекрасно согласуется с зависимостью положения максимума ($L_{\max}$) пояса инжектированных во время геомагнитной бури релятивистских электронов от амплитуды бури ($Dst_{\min}$) (Тверская, 1986).

В обоих случаях до начала геомагнитных бурь наблюдался значительный ПРЭ – 05.12 (рис. 8а) и 12.12 (рис. 8б). Во втором случае уменьшение максимальной величины ПРЭ не наблюдалось, а возрастание произошло уже 14.12 до развития геомагнитной бури (рис. 8б), что может быть связано с увеличением давления СВ (или скорости: корреляция ПРЭ со скоростью СВ впервые описана в (Paulikas, Blake, 1979)) и возникновением суббуревой активности. Уменьшение давление солнечного ветра и поворот B_z-компоненты ММП к югу практически совпадают с главной фазой бури 15.12.2006 (см. рис. 6б), при этом не наблюдается уменьшения величины максимального ПРЭ, а только сдвиг максимума на меньшую L-оболочку. Профиль спада со стороны больших L имеет особенность в виде второго максимума. Можно предположить, что форма радиального профиля ПРЭ на фазе восстановления бури 16.12 определяется совокупностью двух профилей: сдвинутого во время бури “старого” и появившегося на фазе восстановления “нового”.

Сравнительный анализ динамики потоков релятивистских электронов во время двух периодов геомагнитных возмущений показал, что особенности их радиальных профилей определяются предысторией событий, условиями в межпланетной среде, в частности, изменениями давления (или скорости) солнечного ветра, и мощностью геомагнитного возмущения.

Релятивистские электроны под радиационными поясами Земли

Повышенные спорадические потоки электронов радиационных поясов на $L < 2$ вне области Южно-Атлантической магнитной аномалии (ЮАА) на высотах до 1000 км регулярно наблюдаются в экспериментах на борту космических аппаратов (Nagata и др., 1988). И хотя многие вопросы, связанные со структурой таких образований и их динамикой, достаточно хорошо изучены, до сих пор обсуждается проблема их происхождения. Географическая карта распределения потоков заряженных частиц по данным различных экспериментов впервые появилась в работе (Voss, Smith, 1980). На рис. 9 представлена карта распределения потоков электронов на высоте 600 км по данным, полученным в различных космических экспериментах, представленных в табл. 4 (Grigoryan и др., 2008). Статистика наблюдений, по

Таблица 4. Некоторые характеристики экспериментов

КА	Год	Высота, км	Наклонение орбиты, град	Тип детекторов	Энергия заряженных частиц
Космос-900	1977–1979	500	83	ППД 500 мкм	$E_e = 30–210$ кэВ
NOAA TIROS-N	1978	800	98.9	ППД 700 мкм	$E_e > 30, >100, >300$ кэВ
Активный	1989–1992	500–2500	81.3	ППД 300 мкм	$E_e = 30–500$ кэВ
ОС Мир	1991	400	51.6	Сцинтиллятор	$E_e > 100, >500, >1500$ кэВ
				Счетчики Гейгера	$E_e > 75, >300, >600$ кэВ
Коронас-И	1994	500	83	Сцинтиллятор	$E_e > 0.5$ МэВ
SAMPEX	1992–1998	520–670	82	ППД-телескоп	$E_e > 150$ кэВ
ОС Мир	1999	350	51.6	ППД 300 мкм	$E_e = 0.3–1.5$ МэВ
Коронас-Ф	2001–2005	500	82.5	ППД-телескоп	$E_e = 0.3–12$ МэВ
NOAA POES-15	1998	800	98.9	ППД 700 мкм	$E_e > 30, >100, >300$ кэВ
NOAA POES-16	2001	»	»	»	»
NOAA POES-17	2002	»	»	»	»
NOAA POES-18	2005	»	»	»	»
SERVIS	2003–2005	980–1020	99.5	ППД + сцинтиллятор	$E_e = 0.3–10$ МэВ
Университетский–Татьяна	2005–2007	920–980	83	ППД 300 мкм ППД 1 мм	$E_e > 70$ кэВ $E_e = 300–900$ кэВ

которым построена данная карта, велика. Потоки электронов распределены неравномерно, наблюдаются три характерные зоны по широте:

- приэкваториальная область ($L < 1.2$);
- низкие широты ($1.2 < L < 1.4$);
- средние широты ($1.6 < L < 2$).

Основная причина разделения нами потоков электронов вблизи экватора и на средних широтах заключается в том, что всплески потоков на экваторе наблюдаются спорадически, тогда как на средних широтах такие потоки регистрируются постоянно. На рис. 10 показаны примеры регистрации потока электронов на различных L-оболочках по данным МКА Университетский–Татьяна при пролете через экватор и средние широты. Для сравнения приведены траектория спутника в географических координатах и величина потоков электронов в трех энергетических каналах прибора. Дифференциальный поток приведен в логарифмическом масштабе. На рисунке видны характерные области регистрации частиц: радиационные пояса, области под поясами на $L < 2$, возрастания на $L \sim 1.3$ и слабое возрастание потока на экваторе. Данные других спутников подтверждают эти наблюдения.

На рис. 11 показано, что экспериментальные данные за последние более чем 30 лет, полученные различными приборами, на $1.2 < L < 1.4$ ложатся на

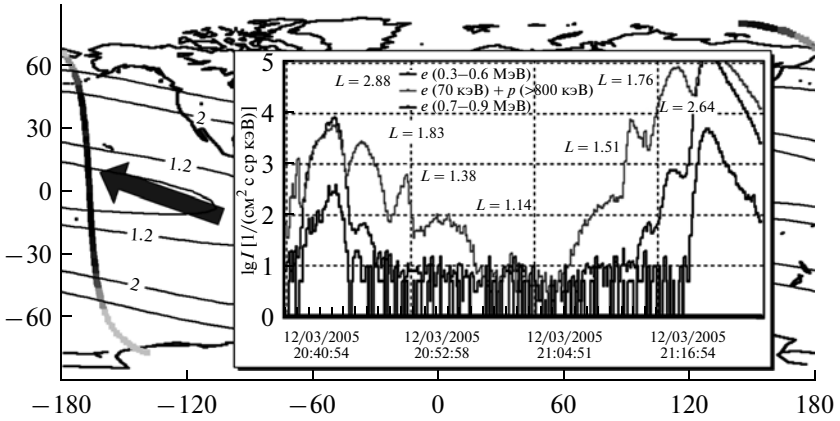

Рис. 10. Пример регистрации потоков электронов с энергиями десятки–сотни кэВ на МКА Университетский–Татьяна (в географических координатах и зависимость потока от времени). На графике приведены данные трех энергетических каналов: электроны с энергией 300–600 кэВ и 700–900 кэВ и электроны с $E > 70$ кэВ с примесью протонов с $E > 800$ кэВ. Обозначены L-оболочки, на которых наблюдаются повышенные потоки электронов.

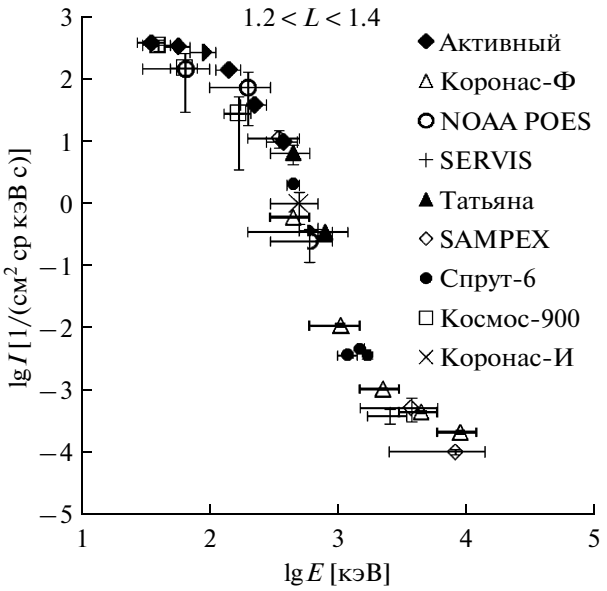

Рис. 11. Дифференциальные спектры потоков электронов на $1.2 < L < 1.4$. Для построения спектров из экспериментальных данных вырезалась область ЮАА.

общий дифференциальный спектр в пределах ошибок. Аналогичные графики получены для всех трех областей на $L < 2$.

Используя данные различных космических экспериментов, мы получили спектры потоков электронов в различных областях на малых высотах на $L < 2$. Показано, что потоки электронов на $L < 2$ наблюдаются регулярно, но распределены в пространстве неоднородно (в основном лежат в интервалах $L < 1.2$, $L \sim 1.2$–1.4 и $L \sim 1.6$–1.9). Интенсивность некоторых потоков на $L \sim 1.6$–1.9 приближается к интенсивности в радиационных поясах на $L > 2$. Спектры потоков в этих областях подобны друг другу и имеют излом на энергии ~1 МэВ. На больших энергиях на $L \sim 1.2$–1.9 спектр несколько жестче.

Обобщенный спектр потоков электронов на $L < 2$ хорошо аппроксимируется Каппа-функцией $f(E) = A\left(1 + \frac{E}{kE_0}\right)^{(-k-1)}$ для энергий $E_e < 1$ МэВ и степенной функцией $f(E) = AE^{(-\gamma)}$ для энергий $E_e > 1$ МэВ.

Можно предположить, что наблюдаемое распределение электронов на $L < 2$ объясняется двумя механизмами: взаимодействие с ОНЧ-волнами доминирует на энергиях меньше 1 МэВ и убегающие электроны – на энергиях более 1 МэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Измерения интенсивности УФ-излучения атмосферы

В безлунные ночи наблюдаемый уровень УФ-излучения в средних широтах (вне зоны полярных сияний) оказался в диапазоне $((3 \times 10^7)$–$(1 \times 10^8))$ фот/(см^2 с ср). Как известно, рассеянный свет звезд и зодиакальный свет ожидается на уровне $<3 \times 10^7$ фот/(см^2 с ср), поэтому наблюдаемый уровень УФ-свечения атмосферы в безлунные ночи скорее всего связан с собственным свечением ночной атмосферы, а в отдельных районах – с человеческой деятельностью.

На рис. 12 приведена карта интенсивности УФ-излучения атмосферы, полученная на МКА Университетский–Татьяна-2, в течение октября–декабря 2009 г. Интенсивность в УФ-диапазоне представлена оттенком серого цвета, шкала интенсивности показана справа от карты. Как видно, минимальная интенсивность УФ-излучения наблюдается в районе океанов и над пустыней Сахара. Регулярно наблюдается повышение интенсивности при выходе на дневную сторону Земли. Выделяются районы, явно связанные с человеческой деятельностью (огни городов в США, Европе, отдельные города в других странах).

При Луне интенсивность УФ-свечения атмосферы зависит от фазы и высоты Луны над горизонтом (см. формулы в пособии (Космический практикум, 2005)).

В течение лунного месяца среднее значение интенсивности УФ-свечения на витке изменяется от 10^8 до 2.5×10^9 фот/(см^2 с ср). При этом интенсивность выше, чем 10^9 фот/(см^2 с ср), бывает лишь в течение ~8 ночей в месяц.

На дневной стороне Земли в районе терминатора максимальная зарегистрированная интенсивность УФ-свечения равна ~10^{13} фот/(см^2 с ср).

Регистрация свечения полярных сияний в северном и южном полушариях Земли

Полярная орбита спутника позволяет проводить изучение полярных сияний на ночной стороне Земли в течение нескольких дней в январе–декабре в северных широтах и нескольких дней в июле–августе в южных широтах. Надежные измерения интенсивности полярных сияний можно провести только в безлунные ночи.

Полярные сияния были надежно зарегистрированы на МКА Университетский–Татьяна, например, 02.07.2005 и 10.07.2005. В эти дни спутник пересекал область полярного овала южнее Австралии с севера на юг. В обоих измерениях локальное время было вблизи полуночи с разницей не более двух часов. В табл. 5 приведены географическая и магнит-

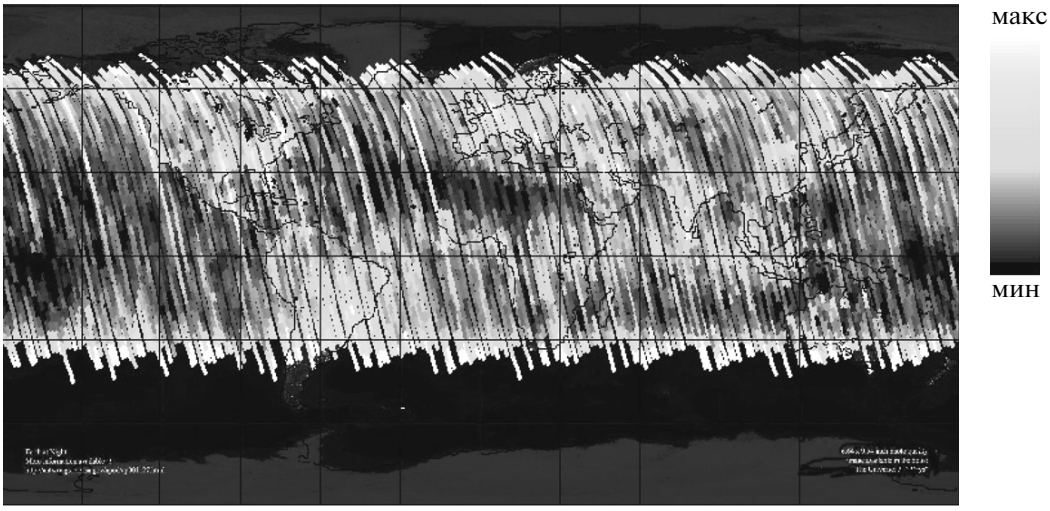

Рис. 12. Карта интенсивности УФ-излучения в безлунные ночи: октябрь–декабрь 2009 г.

ная широта и интенсивность свечения в максимуме рассматриваемых сияний для четырех витков ИСЗ. В табл. 5, для каждого из витков (1)–(4), первый столбец данных соответствует экваториальному краю полярного овала, второй – максимальной интенсивности, третий – приполюсному краю. Следует заметить, что при достаточно широком поле зрения прибора (14°) тонкая структура широтных профилей сияний не разрешается нашим прибором.

Полярное сияние является видимым проявлением взаимодействия заряженных частиц с верхней атмосферой Земли. Наиболее эффективным для возбуждения визуально наблюдаемых форм сияний являются электроны (и протоны) с энергиями в единицы кэВ. По данным детекторов, измерявших на борту МКА Университетский–Татьяна высыпающиеся электроны с энергиями более 70 кэВ, области их высыпания примыкают к экваториальной границе полярного овала, что соответствует выводам (Feldstein, Starkov, 1970).

На некоторых витках спутника в районе экватора наблюдаются превышения интенсивности УФ-излучения над уровнем фона. Во всех зарегистрированных случаях описанные превышения интенсивности УФ-излучения наблюдались над океаном севернее Австралии. Интенсивность в максимуме подобных возрастаний значительно меньше интенсивности свечения полярных сияний в высоких широтах, но превышает обычные слабые изменения интенсивности УФ-излучений в безлунную ночь. Подобные возрастания в низкоширотных областях в полосе 391.4 нм были также зарегистрированы ранее (Шеффер, 1968; Тверская, Тулупов, 1984).

УФ-излучение атмосферы и сопоставление вариаций его интенсивности с вариациями потоков электронов с энергиями >70 кэВ на орбите спутника

Результаты одновременного измерения УФ-излучения и потока электронов с энергиями >70 кэВ на МКА Университетский–Татьяна позволяют сделать вывод, что имеется определенная корреляция между возрастаниями потоков электронов в поляр-

Таблица 5. Географическая (Lat) и магнитная (MLT) широты и интенсивность (*J*) свечения в максимуме полярных сияний 02.07.2005 и 10.07.2005

Параметры событий	02.07.2005						10.07.2005					
	1			2			3			4		
UT	13.39	13.41	13.43	15.25	15.27	15.28	12.05	12.11	12.13	13.48	13.52	13.55
MLT	22.30	22.48	23.12	22.24	22.36	22.48	21.24	22.30	23.12	21.00	21.30	21.48
Mlat, град	–55	–62	–68	–63	–70	–73	–48	–67	–73	–46	–60	–70
Lat, град	–45.6	–52.4	–59.2	–52.8	–59.6	–63.0	–39	–59	–66	–36	–50	–60
J, фот/(см^2 с ср)		8.6×10^8			14.1×10^8			15.3×10^8			25.3×10^8	

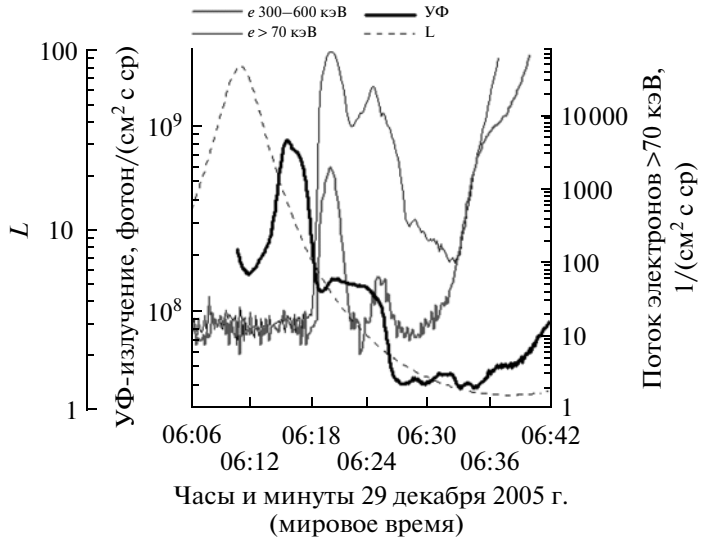

Рис. 13. Интенсивность УФ-излучения (толстая линия) и поток электронов с энергией >70 кэВ (тонкая черная линия), 300–600 кэВ (тонкая серая линия), параметр Мак-Илвайна – L (пунктирная линия) по данным МКА Университетский–Татьяна, полученным 29.12.2005.

ной области и интенсивностью УФ-излучения (Веденькин и др., 2010).

На рис. 13 представлены временны́е вариации интенсивности УФ-излучения атмосферы (направление наблюдения в надир), измеренные одновременно с вариациями потока электронов с энергиями >70 кэВ на МКА Университетский–Татьяна, т.е. на высоте примерно 950 км. На оси абсцисс, расположенной внизу рисунка, приведено мировое время наблюдения в часах и минутах (UT). 29.12.2005 спутник сначала пересекает овал полярных сияний в Северном полушарии – максимум УФ-излучения наблюдался в районе 06:16 UT на $L \sim 10$–12, а потом двигается к экватору. На более низких L-оболочках примерно с 06:20 до 06:24 UT наблюдается второй максимум УФ-излучения, значительно менее интенсивный и более широкий по сравнению с максимумом авроральных овала. Этот второй максимум УФ-излучения мы связываем с возможными высыпаниями квазизахваченных электронов с энергиями >70 кэВ, максимум потока которых наблюдался в 06:26 UT на несколько более низких широтах по сравнению со вторым пиком УФ-излучения. Следует также отметить, что после 06:32 UT, когда спутник попадал в область Южно-Атлантической аномалии (ЮАА), был зарегистрирован резкий рост потока электронов (рис. 13), но возрастания интенсивности УФ-излучения не наблюдалось, что вполне ожидаемо, так как электроны, регистрируемые в области ЮАА, являются захваченными и не высыпаются в атмосферу.

Возрастания интенсивности УФ-излучения в большинстве случаев регистрировались на более высоких широтах, чем максимум потока электронов. Мы объясняем это тем, что происходит трансформация питч-углового распределения электронов, в результате которой наблюдается, с одной стороны, возрастание потока электронов в месте нахождения спутника, и, с другой стороны, возрастание потока электронов на более высоких широтах (в конусе потерь), где и происходит УФ-излучение от “высыпающихся” электронов.

Исследование транзиентных световых явлений в атмосфере

Вспышки электромагнитного излучения, связанные с разрядами в верхней атмосфере. Известно (см., например, обзоры (Хренов и Гарипов, 2007; Sentman, 2010)), что существуют быстрые вспышки электромагнитного излучения в верхней атмосфере. Такие разряды значительно превосходят по пространственному размеру молниевый разряд. Длительность разрядов невелика (миллисекунды), что при столь больших размерах указывает на высокую скорость распространения разряда в пространстве (скорость, близкая к скорости света). В подобных разрядах возникают локальные “космические объекты”, физику которых интересно изучать не только с точки зрения взаимосвязи Земли и ближнего космоса, но и с точки зрения возможности изучения самих “космических объектов”, создание которых пока невозможно в лабораторных условиях.

Пространственная форма разрядов и их развитие во времени весьма разнообразны. С помощью детекторов, способных наблюдать цвет свечения (его спектральный состав), получены данные от том, что спектр свечения разряда может изменяться от пре-

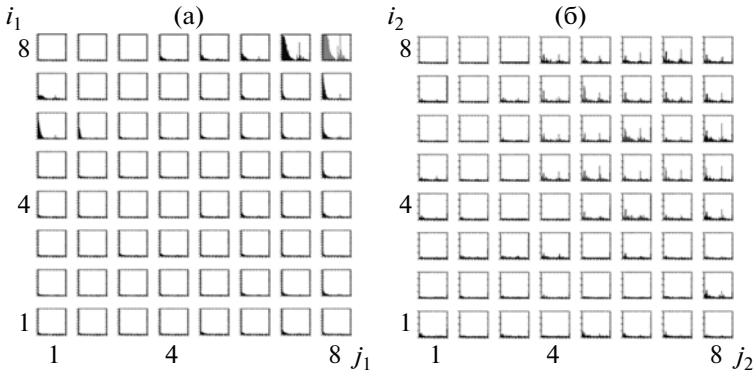

Рис. 14. Пример регистрации вспышки телескопом МТЕЛ: (а) – первым телескопом с широкоугольной системой поиска координат вспышки (i_1, j_1) и измерения временнóго профиля; (б) – вторым телескопом высокого разрешения по ячейкам (i_2, j_2).

имущественно синего и ультрафиолетового в нижней части атмосферы (высоты менее 50 км) до широкого спектра во всем видимом диапазоне и особенно в красной области в верхней атмосфере (высоты более 50 км). В некоторых разрядах наблюдается рентгеновское и гамма-излучение. С помощью видеокамер, расположенных на земле и на самолетах, были зарегистрированы различные типы вспышек, получившие названия спрайт (sprite), голубая струя (blue jet), эльф (elve), отличающиеся спектром излучаемого света, длительностью и формой распределения в атмосфере (см. рисунок в работе (Pasko, 2003)).

В предыдущих работах данные о глобальном распределении вспышек различного типа скудны, так как в большинстве работ вспышки изучались в отдельных районах Земли с помощью аппаратуры, установленной в горах или на самолетах. Исключение составляют работы, выполненные на ИСЗ Formosat-2 с помощью аппаратуры ISUAL. Согласно этим данным вспышки типа эльф встречаются чаще всего. Эти вспышки наблюдаются как над районами с высокой грозовой активностью, так и над океанами в районах с минимальной частотой молний (Mende и др., 2005; Hsu и др., 2009). Вспышки типа спрайт чаще всего наблюдаются над континентами в соответствии с распределением молний (Christian и др., 2003). Вспышки гамма-излучения, зарегистрированные детекторами на спутниках BATSE (Fishman и др., 1994) и RHESSI (Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) (Smith и др., 2005), также чаще встречаются над материками, хотя вероятность их возникновения ниже, чем у спрайтов.

Вспышки ультрафиолетового излучения в экваториальном районе Земли. Детекторы вспышек УФ-излучения, примененные на МКА Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2, позволили получить новые данные о глобальном распределении вспышек, благодаря простому способу их отбора: по яркости (энергии, выделенной в УФ-излучение в атмосфере и попавшей в апертуру обзора детектора за заданное время интегрирования) в строго ограниченном поле зрения. В детекторе МКА Университетский–Татьяна вспышки отбирались с двумя значениями времени интегрирования: 0.4 мс (для изучения временнóго профиля вспышек с длительностью до 4 мс) и 6.4 мс (для изучения вспышек с длительностью до 64 мс). Примеры зарегистрированных временны́х профилей событий вспышек приведены в опубликованных работах.

Пример регистрации вспышки первым телескопом MTEL на МКА Университетский–Татьяна-2 в области обзора 160×160 км^2 представлен на рис. 14а. АЦП электроники телескопа измеряет цифровое значение амплитуды сигнала каждые 10 мкс. Полезное событие выбирается как событие с самой большой амплитудой сигнала, просуммированного в течение 40 мкс, в период измерения 1 мин. По команде триггера измеряются амплитуды сигналов во всех 64 ячейках ФЭУ. На рис. 14 в каждом окошке, имеющем координаты: $(i\,j)$, сигнал представлен в виде осциллограммы. Осциллограмма имеет переменный шаг во времени: первые 100 шагов с длительностью шага 40 мкс, следующие 50 шагов – с длительностью 1.28 мс, следующие 25 шагов по 2.56 мс, далее 20 шагов по 10.2 мс и, наконец, 8 шагов по 20.5 мс. В начале развертки, до появления триггера сигналы, которые сохранялись в кольцевой памяти, также представлены в осциллограмме 15-ю шагами с длительностью 10 мкс. Амплитуда сигнала на рис. 14 представлена в кодах АЦП. В приведенном примере максимальный сигнал наблюдается в оптической ячейке с координатами: $i_1 = 8, j_1 = 8$. Электроника МТЕЛ по максимальному сигналу определяет направление на источник сигнала и дает команду на поворот зеркала второго телескопа (с высоким разрешением) в этом направлении. Изображение вспышки во втором телескопе принимается вторым многоанодным ФЭУ с разрешением ячейки 5×5 км^2, рис. 14б. В каждой ячейке изображение регистриру-

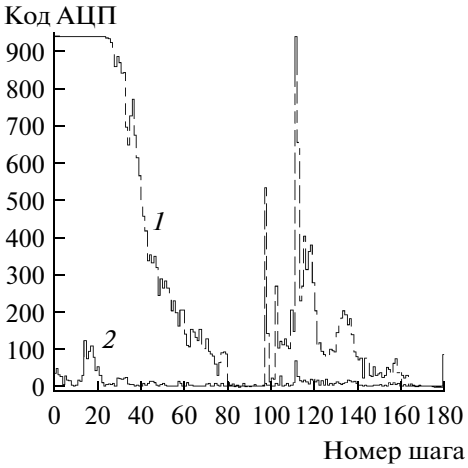

Рис. 15. Осциллограммы сигналов: *1* – в первом телескопе в ячейке с координатами: $i_1 = 8, j_1 = 8$; *2* – во втором телескопе в ячейке с координатами: $i_2 = 7, j_2 = 5$.

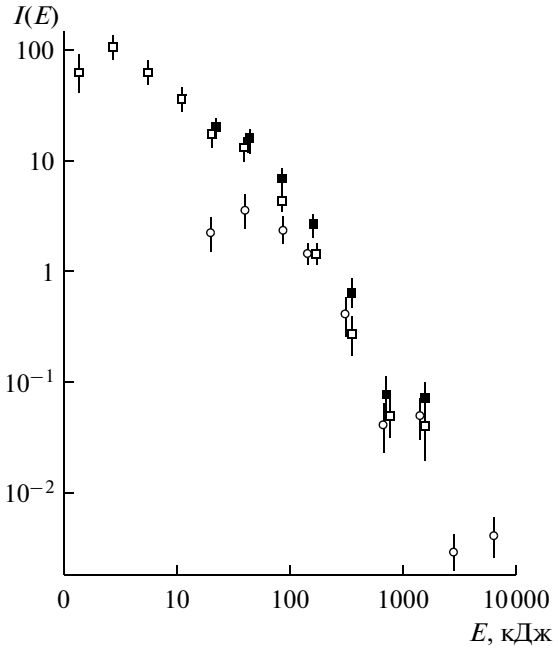

Рис. 16. Дифференциальный энергетический спектр УФ-вспышек. Квадраты незаполненные – вспышки с длительностью ~4 мс, кружки – с длительностью ~64 мс, квадраты заполненные – спектр всех зарегистрированных вспышек. По оси ординат отложена частота событий в месяц на кДж энергии вспышки на площади обзора атмосферы 6×10^4 км^2.

ется в виде осциллограммы с теми же шагами, что и в первом телескопе.

На рис. 15 временны́е профили в ячейках обоих телескопов ($i_1 = 8, j_1 = 8$ – кривая *1* и $i_2 = 7, j_2 = 5$ – кривая *2*) представлены в увеличенном масштабе. Видно, что отбор вспышки произошел в первые 40 мкс, когда вспышка имела предельные значения кода АЦП, затем амплитуда сигнала уменьшалась, и примерно через 100 шагов (4 мс) после триггера возникла вторая вспышка, которая длилась несколько мс. В первом телескопе обе вспышки регистрируются в двух-трех соседних ячейках, т.е. имеют размеры в атмосфере около 20–40 км. Более подробное изображение во втором телескопе получено по данным 20 ячеек, т.е. с общим размером вспышки 20 × × 25 км. Видно, что вторая вспышка появилась во всех ячейках одновременно, но амплитуда ее разная и, в принципе, по данным ячеек второго телескопа можно построить изображение вспышки.

На МКА Университетский–Татьяна из-за ограниченной скорости передачи данных на Землю на одном витке спутника отбиралась одна, наиболее мощная вспышка в каждом из выбранных диапазонов длительности вспышек. При таком отборе большинство вспышек имели яркость, значительно превышающую средний уровень УФ-излучения атмосферы. На рис. 16 показаны спектры вспышек по выделенной энергии в атмосфере, отобранные и измеренные с помощью осциллографов с двумя разными шагами построения временно́го профиля. Обращает на себя внимание сравнительно пологий вид энергетического спектра вспышек $f(E)$ при энергиях <100 кДж: показатель дифференциального спектра ~–1. При энергии около 100 кДж наклон спектра увеличивается (~–2). Принимая эту экспериментальную аппроксимацию спектра вспышек по выделенной энергии, получаем суммарную энергию, выделенную вспышками в атмосфере E_a:

$$E_a = \int_3^{100} E \times \frac{k_1}{E} \mathrm{d}E + \int_{100}^{10000} E \times \frac{k_2}{E^2} \mathrm{d}E. \qquad (1)$$

Нормируя два степенных спектра в точке $E =$ $= 100$ кДж ($k_2 = 100\, k_1$), получаем отношение энергии, выделенной вспышками с энергией >100 кДж, к энергии, выделенной вспышками с энергией 3–100 кДж, примерно равное 5, то есть основной вклад в энергетический баланс атмосферы вносят транзиентные события с яркостью вспышки в УФ-диапазоне >100 кДж. Изменение спектра вспышек при энергии (яркости) $E < 100$ кДж, скорее всего, связано с тем, что в поле зрения детектора не попадает вся “вспыхивающая” площадь атмосферы (“краевой эффект”). Ниже при обсуждении данных, полученных на ИСЗ “Университетский–Татьяна-2”, этот эффект обсуждается более подробно.

Распределение вспышек на карте Земли оказалось одинаковым для обеих длительностей вспышек. Географические координаты вспышек определялись по времени регистрации и известным координатам спутника. Ошибка позиционирования спутника на орбите не превышала 100 м. Ошибка в ориентации детектора не превышала ±3°. За два года работы детектора на МКА Университетский–Татьяна общее число зарегистрированных вспышек

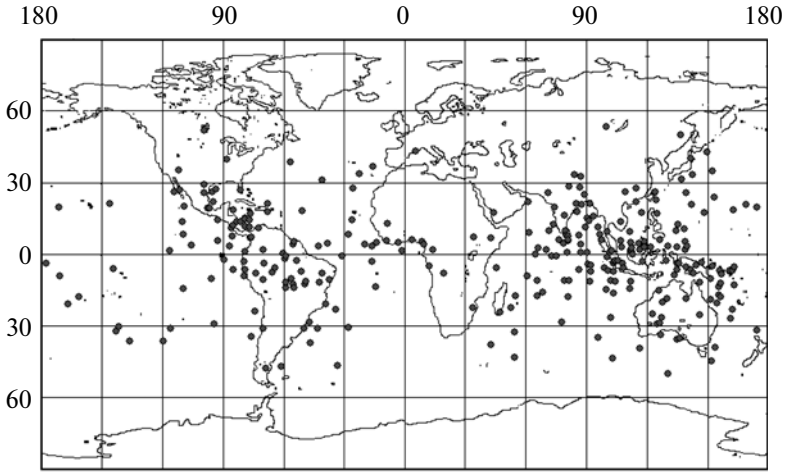

Рис. 17. Распределение вспышек на карте Земли. Данные ИСЗ Университетский–Татьяна.

330. Как видно (рис. 17), вспышки концентрируются вблизи экватора: 80% событий наблюдается на широтах от 30° СШ до 30° ЮШ.

Полученные на МКА Университетский–Татьяна энергетические характеристики вспышек УФ-излучения (энергия, выделенная в атмосфере, – 10–1000 кДж за время 1–64 мс) и их распределение на карте Земли оказались близки к характеристикам электрических разрядов типа эльф, а самые мощные – к характеристикам разряда типа гигантская голубая струя (Гарипов и др., 2005б; Garipov и др., 2005; Хренов и др., 2008; Milikh, Shneider, 2008).

На МКА Университетский–Татьяна-2 было продолжено изучение УФ-вспышек и, в частности, их распределения на карте Земли. В детекторе МКА Университетский–Татьяна-2 электроника отбора событий выбирала УФ-вспышки при новом условии: “самая яркая вспышка за период наблюдения – одна минута при времени интегрирования отбираемых вспышек 1 мс”. При анализе данных для выделения событий, заведомо отличающихся от флуктуаций средней светимости атмосферы, за событие “вспышка” принималось событие с кодом $N > 100$ при измерении за интервал времени 1 мс. Напомним, что средний уровень светимости за этот интервал времени $N = 16$. При таком условии отбора были проанализированы около тысячи вспышек по данным спутника Университетский–Татьяна-2.

На рис. 18 приведен пример наблюдения вспышки детекторами УФ- и ИК-излучения и одновременно измерения потока электронов на орбите спутника детектором заряженных частиц. Видно, что на развертке длительностью 128 мс регистрируется более одной “короткой” (длительностью около 1 мс) вспышки. По сравнению с данными первого спутника появилась возможность измерять отношение яркости вспышек в УФ- и ИК-диапазонах длин волн. В большинстве событий вспышки длительностью ~1 мс наблюдаются одновременно в обоих диапазонах длин волн.

Ни в одной из зарегистрированных вспышек не наблюдается одновременный (в пределах длительности УФ-вспышки 1–4 мс) достоверный всплеск потока электронов, приходящих из атмосферы. Подобные синхронные всплески потока электронов могли бы наблюдаться при большом потоке электронов, ускоренных в атмосферном электрическом

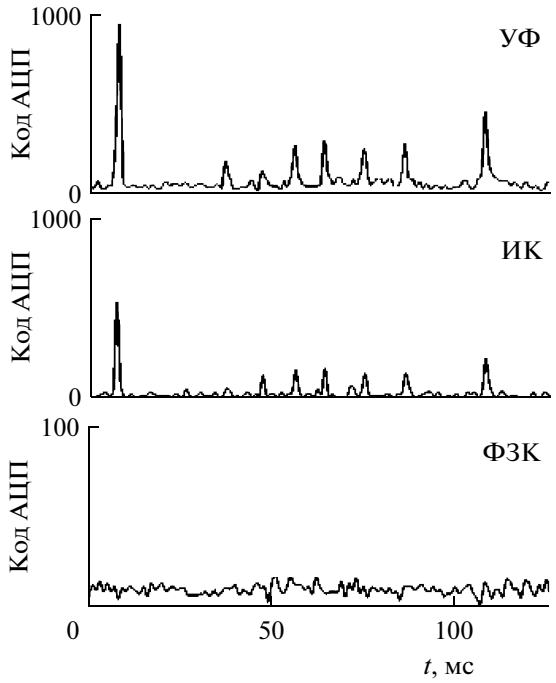

Рис. 18. Пример одновременной регистрации вспышек детекторами УФ-, ИК-излучения и измерения детектором ФЗК потока заряженных частиц (нет синхронных с УФ-всплесков) при пролете в области ЮАА.

разряде (Carlson и др., 2009). Эти, “уходящие” из атмосферы электроны, скорее всего, захватываются геомагнитным полем. Синхронно с оптической вспышкой могут появиться только электроны, “удачно” рассеянные в верхней атмосфере в направлении орбитального детектора. Вместе с тем, отсутствие синхронных всплесков потока электронов не исключает возможности существования значительного потока электронов, захваченного магнитным полем и вынесенного за пределы местонахождения орбитального детектора. Оценки показывают, что на малых магнитных широтах ~0°–30° при наклонении магнитного поля 50°–90° магнитное поле отклоняет электроны высокой энергии (десятки МэВ) от вертикали так, что пучок электронов может уйти в сторону от точки наблюдения УФ-излучения на расстояния в сотни км.

Флуктуации сигнала детектора ФЗК, при пересечении области Южно-Атлантической Аномалии (ЮАА), были рассмотрены отдельно. При пересечении ЮАА детектор ФЗК регистрирует заметное свечение сцинтилляционной пластины от потока заряженных частиц за миллисекундный интервал. Средний сигнал за 1 мс, возникающий на ФЭУ, принимающем свет от сцинтилляционной пластины площадью 350 см^2, соответствует выделению в пластине энергии ~1 МэВ со стандартным отклонением $\sigma \sim 0.25$ МэВ. При рассмотрении ~100 пересечений ЮАА на развертках осциллографа ФЗК (длительностью 128 мс каждая) наблюдалось 11 миллисекундных всплесков сигнала с отклонением от среднего значения на $>5\sigma$ при ожидаемом по распределению Гаусса числе таких всплесков 0.01. Характерно, что длительность наблюдаемых всплесков сигнала $>5\sigma$ минимальна (1 мс), в то время как на уровне среднего сигнала длительность повышенных значений сигнала составляет ~2–3 мс. На наш взгляд, эти всплески связаны с прохождением через пластину сцинтиллятора отдельных частиц с большим энерговыделением (релятивистские электроны с энерговыделением в пластине ~1 МэВ, протоны с энерговыделением $\gg$1 МэВ), которые, как известно, присутствуют в спектре захваченных в ЮАА частиц. Подобные быстрые всплески сигнала ФЗК, встречаются и на развертках детектора вне ЮАА, они случайно распределены во времени и не связаны во времени со вспышками УФ- и ИК-диапазона.

При новом условии отбора вспышек открылась возможность наблюдать события в отдельных районах Земли с большой частотой (порядка 1 мин$^{-1}$). На рис. 19 приведено распределение вспышек УФ- и ИК-излучения по координатам на карте Земли (координатам центра поля зрения детекторов, направленных в надир) за одни сутки (15–16 ноября 2009 г., 14 витков). Как видно, вспышки крайне неравномерно распределены по виткам: в большинстве витков (11 из 14) регистрируется не более одной вспышки. В то же время на каждом из остальных трех витков число вспышек превышает 6, т.е. практически все вспышки за сутки зарегистрированы на этих выделенных витках.

Карта облачности в те часы и в тех районах, где наблюдались серии вспышек, показывает значительно меньшие по размерам грозовые образования (рис. 19) так, что расположение многих УФ-вспышек оказывается вне грозовых образований. В отдельных случаях место вспышки было сопоставлено с расположением молний, зарегистрированных глобальной сетью радиостанций [webflash.ess.washington.edu] (рис. 20). Расположение многих вспышек, регистрируемых детектором ДУФиК, не совпадает с местом зарегистрированных молний. Этот факт, также как наблюдение вспышек в безоблачных образованиях, указывает на то, что электрический разряд, ответственный за вспышку УФ- и ИК-излучения, иногда развивается вне облачных грозовых образований.

Распределение на карте Земли вспышек, отобранных по новому условию – “самая яркая вспышка за одну минуту”, значительно отличается от распределения, полученного на МКА Университетский–Татьяна. Оказалось, что над континентами и, особенно, в области Южной Америки, Центральной и Южной Африки, Индии и Индонезии–Австралии вспышки встречаются значительно чаще, чем над океанами, рис. 21. Вместе с тем, при применении к данным детектора МКА Университетский–Татьяна-2 предыдущего условия отбора – “самая яркая вспышка за один виток” – результаты МКА Университетский–Татьяна хорошо воспроизводятся.

Следует иметь в виду, что новое условие отбора вспышек в эксперименте Университетский–Татьяна-2 уменьшает пороговый эффект отбора событий с малой энергией (несколько кДж). На рис. 22 приведен энергетический спектр вспышек, зарегистрированных в этом эксперименте.

Видно, что в спектре присутствуют события с энергией <1 кДж, которые ранее, по данным МКА Униеристетский–Татьяна, не отбирались. Результаты МКА Униеристетский–Татьяна-2 подтверждают преобладающую концентрацию вспышек в приэкваториальной области.

Обычно, происхождение вспышек в верхней атмосфере связывают с электромагнитным импульсом, генерированным молнией в нижних слоях атмосферы. Экспериментальные данные МКА Университетский–Татьяна-2 показывают, что многие из зарегистрированных вспышек с энергией 1–100 кДж происходят в безоблачных районах, где молниевые разряды не наблюдаются. Вместе с тем, появление УФ-вспышек явно связано с масштабными грозовыми образованиями над континентами. В качестве рабочей гипотезы рассмотрим вариант модели события типа эльф, который позволяет понять новый результат. Основой модели развития разряда является генерация электромагнитного импульса мол-

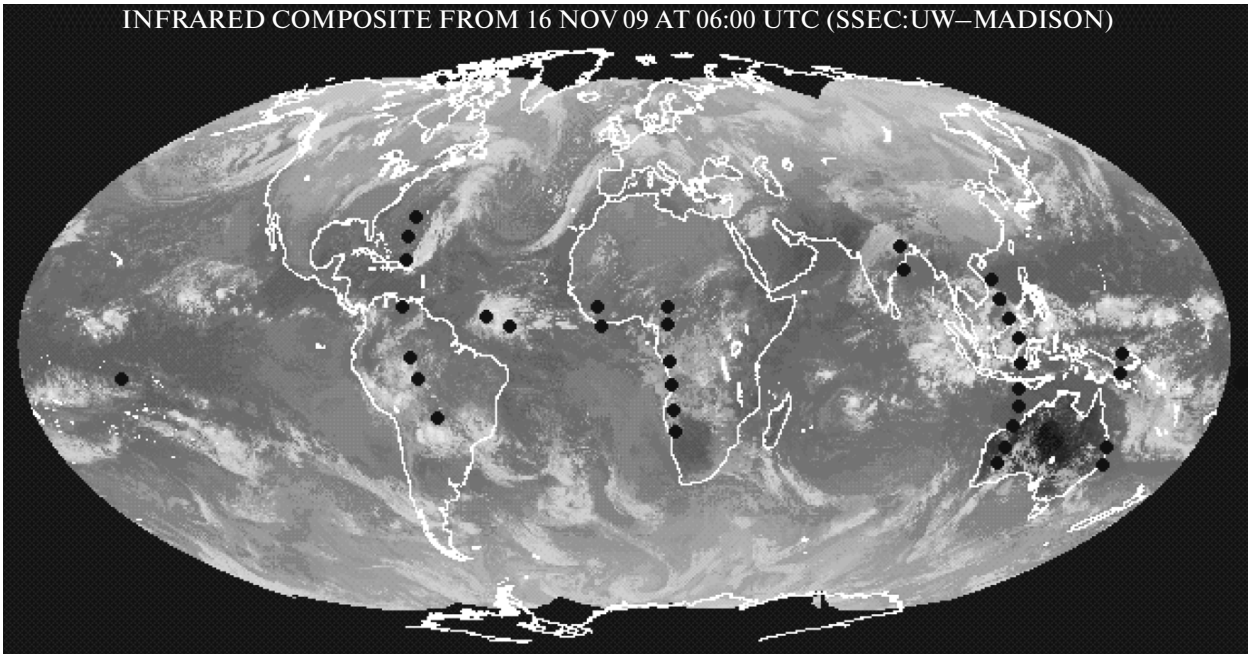

Рис. 19. Распределение вспышек на карте Земли за один день работы МКА Университетский–Татьяна-2 (черные кружки). Карта распределения облаков – комбинированные ИК-изображения по данным ИСЗ GOES, Meteosat и MTSAT (http://www.ssec.wisc.edu/data/comp/ir/).

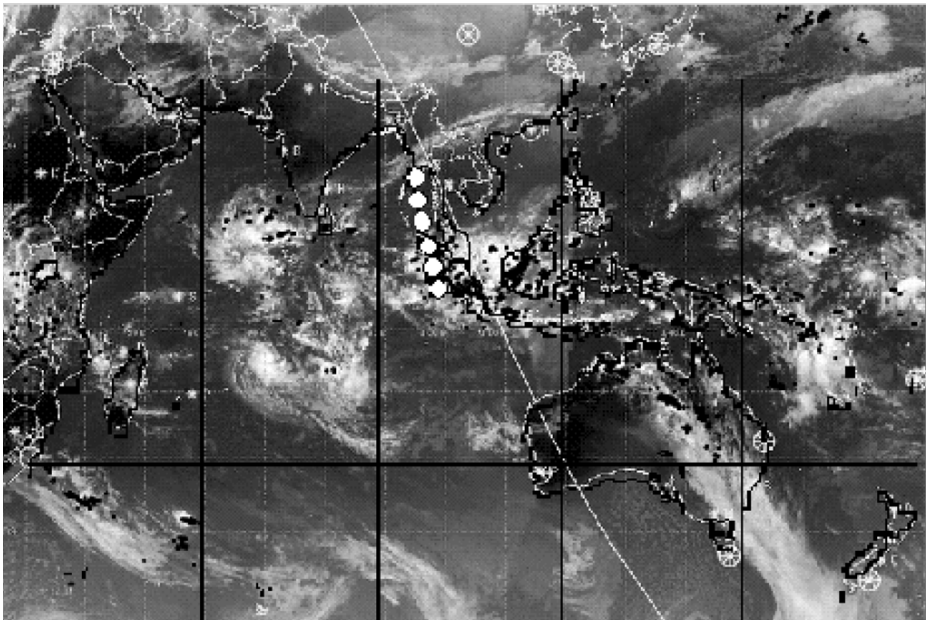

Рис. 20. Пример регистрации УФ-вспышек над грозовой областью (24.12.2009). Из 6 вспышек (белые кружки) три наблюдаются в безоблачном районе, где нет молниевых разрядов (World Wide Lightning Location Network, http://wwlln.net/). Молнии представлены черными точками. Ближайшие радиостанции, регистрирующие молнии, представлены кружками со звездой внутри. Облака видны как серые образования на фоне черного океана.

нией в нижней атмосфере. Электрическая компонента импульса, достигая ионосферы, ускоряет электроны ионосферной плазмы до энергии возбуждения уровней излучения молекул азота и кислорода и даже до энергии ионизации этих молекул. В ионосфере образуется слой нагретой плазмы в присутствии нейтралов, который излучает характерные линии возбужденных молекул в двух характерных диапазонах длин волн: УФ-диапазоне (300–400 нм) и красном-инфракрасном (600–800 нм).

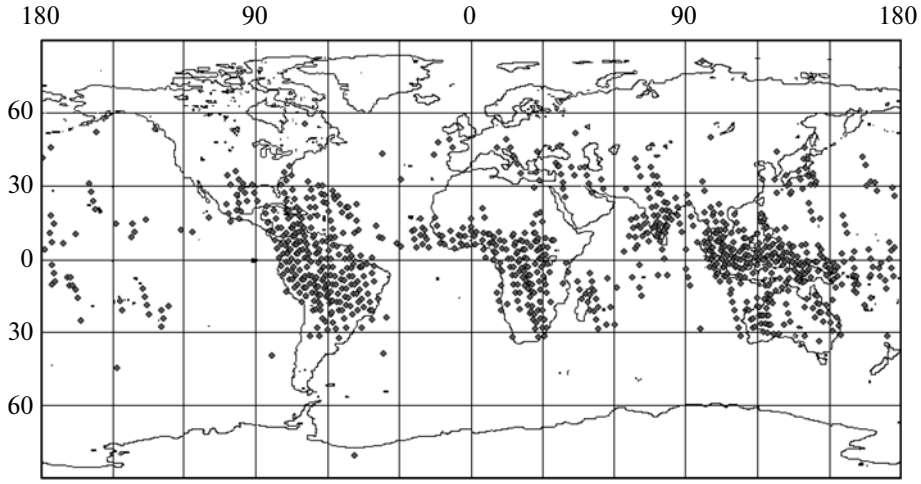

Рис. 21. Распределение вспышек на карте Земли, данные детектора УФ-излучения Университетский–Татьяна-2. Условие отбора: “самое яркое событие за минуту”.

Пространственное распределение этого светящегося слоя в ионосфере имеет кольцевую форму с центром в точке над молнией.

Для объяснения данных МКА Университетский–Татьяна-2 необходимо, чтобы радиус (R) кольца свечения достигал 1–2 тысяч км. В этом случае регистрация свечения может происходить далеко от места нахождения молнии-инициатора так, как показано на рис. 23. В приеме сигнала от подобного разряда важную роль играют взаимные размеры диаметра площади поля зрения детектора (D), радиуса кольца свечения (R) и его поперечного диаметра (d). В нашем опыте $d \sim D \ll R$. Детектор УФ-излучения принимает только небольшую долю энергии (E) высвечивания, пропорциональную той части светящегося кольца, которую наблюдает детектор:

$$E \sim D/2\pi R. \quad (2)$$

При этом площадь регистрации событий

$$S \sim 2\pi RD \quad (3)$$

становится значительно больше, чем площадь поля зрения детектора – $\pi D^2/4$. Для заданного параметра прибора D энергетический спектр событий с энергией свечения E можно найти заменой в (3) радиуса R на E в соответствии с (2), т.е. степенной спектр с показателем –1.

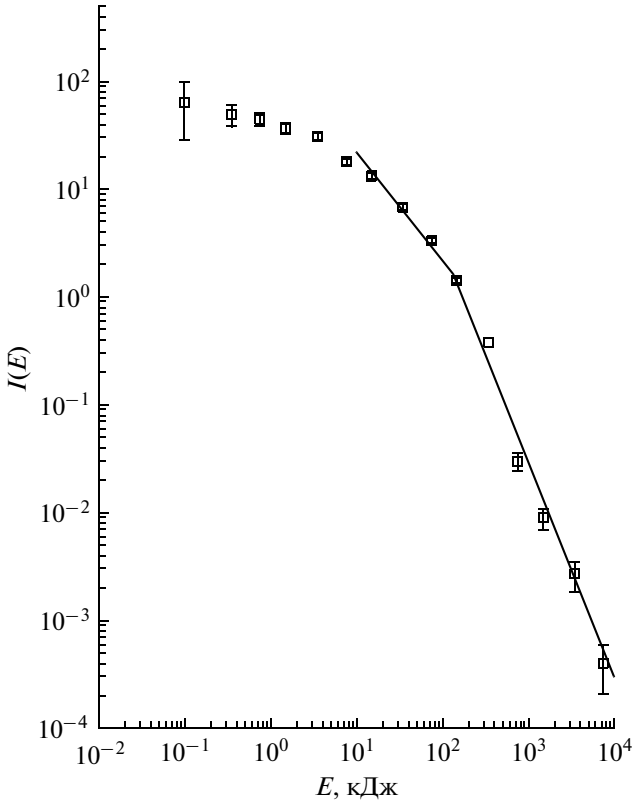

Рис. 22. Энергетический спектр отобранных вспышек УФ-излучения по условию “самое яркое событие за минуту” в эксперименте Университетский–Татьяна-2.

Именно такой спектр и наблюдается, рис. 22, в области небольших энергий $E < 100$ кДж. Как видно, принятая рабочая гипотеза позволяет объяснить вид спектра вспышек при этих энергиях “краевым эффектом” наблюдения вспышек с помощью сравнительно малой апертуры детектора (диаметр обзора атмосферы 230 км). При этом общая частота регистрации вспышек пропорциональна электрической активности больших площадей атмосферы, над которыми пролетает спутник.

Вместе с тем, эта гипотеза не претендует на объяснение наблюдаемых самых ярких событий (>100 кДж), распределение которых на карте Земли (рис. 17) явно не повторяет распределение молний.

Интересным экспериментальным фактом, обнаруженным с помощью аппаратуры МКА Универ-

ситетский–Татьяна-2, является наблюдение нескольких вспышек с длительностью порядка мс за время 128 мс (длительность развертки осциллографа, запускаемого системой отбора вспышек по условию “самая яркая вспышка за минуту”). В отдельных случаях (см. рис. 18) короткие вспышки следуют друг за другом с временны́ми интервалами в десятки мс. В рамках рассмотренной модели разряда эти события могут быть объяснены тем, что спутник пролетает вблизи области высокой электрической активности, где разряды молний, создающие регистрируемые вспышки, происходят с частотой ~ десятков в секунду. Размер площади, в пределах которой импульсы свечения разрядов будут успевать приходить к детектору примерно с одинаковым временем (разбросом во времени менее десятков мс), зависит от скорости развития разряда. При скоростях развития разряда порядка скорости света эти размеры порядка тысяч км. Чтобы создать несколько вспышек в течение 128 мс, вспышки на площади порядка 10^6–10^7 км^2 должны происходить с частотой 30 с$^{-1}$. Районы с такой молниевой активностью известны и расположены как раз в тех приэкваториальных местах Земли (Африка, Южная Америка, Бразилия), где и наблюдаются вспышки по данным МКА Университетский–Татьяна-2. Примером такого района может служить грозовое образование на рис. 20 в Индонезии.

Для полного понимания происхождения наблюдаемых УФ-вспышек необходимо продолжить накопление экспериментальных данных как о характеристиках вспышек, в частности об их пространственных размерах, так и о пространственно-временных корреляциях между вспышками и молниями. Исследование феномена УФ-вспышек будет продолжено в последующих космических экспериментах Чибис, Рэлек и ТУС (Khrenov, Panasyuk., 2001; Panasyuk и др., 2010).

Корреляция вспышек ультрафиолетового излучении атмосферы в экваториальном районе Земли с фазой Луны. В работе (Garipov и др., 2008) исследованы яркость и частота регистрации вспышек УФ-излучения при разных фазах Луны и показано, что между ними существует определенная связь. Наблюдается корреляция фазы Луны и энергетического спектра вспышек (Гарипов и др., 2010). В полнолуние частота ярких вспышек на 15σ превышает интенсивность вспышек в другое время.

Как было отмечено выше, наблюдаемые вспышки УФ-излучения, скорее всего, являются результатом развития электрического стримерного разряда в верхней атмосфере (или нижней части ионосферы). Электрические поля в атмосфере возникают в районах с повышенной концентрацией водяного пара и большими скоростями его турбулентного движения. Сопоставление данных работы (Noël и др., 2006) о распределении количества водяного пара в столбе атмосферы с географическими координатами вспышек показывает (рис. 24 – данные МКА Университетский–Татьяна), что зона наблюдения вспышек УФ-излучения в районе экватора практически совпадает с зоной наблюдения водяного пара. Из сравнения распределения вспышек в полнолуние и новолуние следует, что, возможно, реальным фактором, связывающим распределение вспышек и фазу Луны, является распределение количества водяного пара, который в полнолуние концентрируется ближе к экватору, благодаря приливным силам Луны.

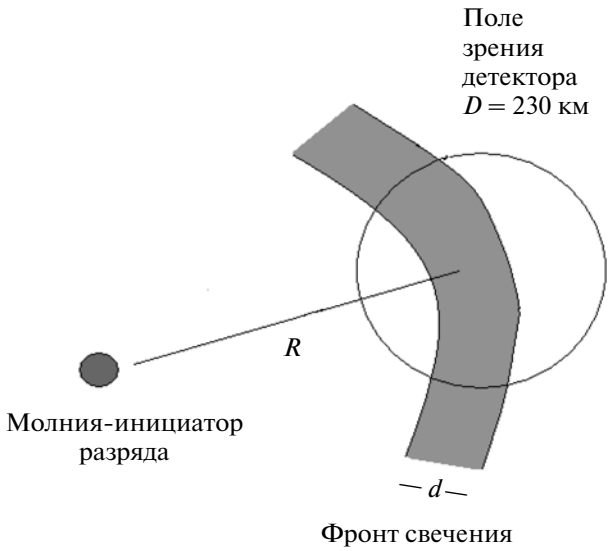

Рис. 23. Схема модели “дальней регистрации” УФ-вспышек на ИСЗ.

Вопрос о корреляции частоты молний с фазой Луны был поставлен много лет тому назад в работе (Lethbridge, 1970), в которой был проведен анализ корреляции частоты молний с фазой Луны. Обработка данных о грозовой активности 108 станций наблюдения в США в 1930–1933 и 1942–1965 годы позволила показать, что частота молний изменяется с фазой Луны. Найденное значение пика частоты молний в полнолуние оказалось на 2.7 σ выше среднестатистического уровня частоты молний. После дополнительной математической обработки полученных данных был обнаружен пик со сдвигом в два дня после полнолуния, в котором частота молний превышает среднее значение на 4.8 σ. По мнению автора, не только приливные силы Луны влияют на грозовую активность, но важным фактором является пересечение Луной в дни полнолуния хвоста магнитосферы с тонким нейтральным слоем, где происходит ускорение частиц; приливные силы и искажение магнитных силовых линий позволяют этим частицам входить в атмосферу на широтах, обычно закрытых для частиц; в результате ионизация атмосферы, создаваемая этими частицами, нарушает энергетический баланс между ионосферой и землей

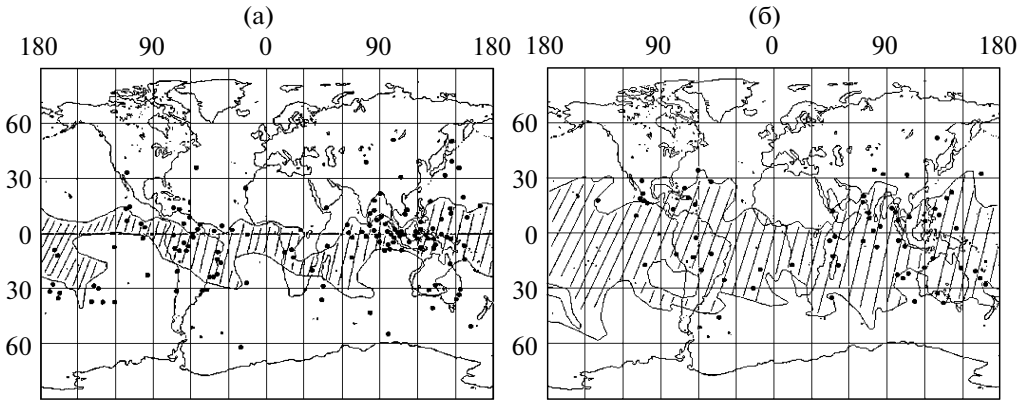

Рис. 24. Корреляция распределения вспышек с фазой Луны. Данные МКА Университетский–Татьяна: (а) – события при полной Луне (заштрихована область с интегральной плотностью водяных паров >5 г/см^2); (б) – события при новолунии (заштрихована область с интегральной плотностью водяных паров >3 г/см^2).

и создает благоприятные условия для грозообразования.

Возможно, что дополнительные электрические поля в атмосфере вызываются действием приливных сил Луны на земную кору таким образом, что появляются локальные повышения напряженностей электрического поля. В этом случае можно ожидать связь между сейсмическими явлениями и частотой вспышек УФ-излучения в атмосфере. На возможность такой корреляции указывает высокая частота вспышек УФ-излучения, наблюдавшаяся в районе Индонезии и Индийского океана, где в 2005–2009 гг. отмечалась повышенная сейсмическая активность. Обнаруженный эффект увеличения частоты и усиления яркости вспышек УФ-излучения в полнолуние требует дальнейших исследований.

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА

Концепция образовательной космической программы МГУ была сформулирована в ходе подготовки проекта Университетский–Татьяна. А именно, образовательная программа должна быть открытой и общедоступной, некоммерческой и многоуровневой. В этой концепции университетский МКА должен выступать летающей учебной лабораторией, в которой студент любого университета, при надлежащей подготовке, может выполнить лабораторную, курсовую или дипломную работу естественнонаучного профиля.

Впервые был создан космофизический практикум, основной целью которого является не только знакомство учащихся с важнейшими физическими явлениями в околоземном космическом пространстве, но и внедрение современных космических исследований в университетское и школьное образование. Практикум имеет многоуровневую систему:

– специальный практикум по космофизике;

– циклы общедоступных лабораторных работ для студентов естественнонаучных специальностей всех уровней или “продвинутых” школьников;

– общеобразовательный курс для подготовки потенциальной аудитории.

Идея создания учебного пособия “Космический практикум” возникла в период подготовки к полету МКА Университетский–Татьяна. “Космический практикум” – это цикл лабораторных работ, выполняемых на основе научной и служебной телеметрии, поступающей с космических аппаратов, и открытой космофизической информации, находящейся в Интернете. Пособие получило гриф учебно-методического объединения, выдержало два издания, и передано практически во все российские университеты. Для выполнения задач “Космического практикума” данные МКА Университетский–Татьяна по потокам частиц и УФ-излучению, привязанные к координатам и времени, были представлены на сайтах http://cosmos.msu.ru (в разделе “Данные”).

Для более широкого круга пользователей было создано электронное пособие “Космофизика-2007”, как естественное продолжение “Космического практикума”. Помимо студентов старших курсов, специализирующихся в области физики космоса, астрономии и геофизики, задачи из данного пособия могут быть предложены студентам младших курсов естественнонаучных и технических направлений, а также старшеклассникам, интересующимся физикой окружающего мира. Электронное пособие “Космофизика-2007” явилось результатом совместной разработки сотрудников НИИЯФ МГУ и инженерно-физического факультета высоких технологий Ульяновского государственного университета, в котором в процессе работы по проекту Университетский–Татьяна была со-

здана лаборатория космических исследований. Основная цель ее создания состояла в выполнении работ по проекту и новым перспективным разработкам по образовательным космическим программам. Лаборатория стала базой Ульяновской секции Поволжского отделения Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского.

Очень интересным и необычайно эффективным элементом работы с молодежью стали космофизические школы. Начиная с 2004 г., ежегодно, осенью, НИИЯФ МГУ проводит такие школы на базе Ульяновского и Костромского государственных университетов. Основной целью школ является знакомство участников с последними достижениями современных космических исследований, практикой и возможностями их внедрения в высшее образование, вопросами улучшения качества подготовки специалистов для современной космической отрасли. Многие научные доклады основаны на данных, полученных с борта МКА Университетский–Татьяна. Особое внимание уделяется научным и образовательным программам, которые будут реализованы на перспективных университетских космических аппаратах. В работе школ принимают участие преподаватели, студенты и аспиранты из МГУ, университетов г. Ульяновска, г. Костромы, г. Иванова, г. Ярославля, г. Самары и других российских городов, а также Казахстана, Белоруссии и Украины. Обычное число участников – около 20 ученых и преподавателей и 80 студентов и аспирантов.

Важно отметить, что, помимо прочего, на космофизических школах происходит не только апробация задач космофизического практикума, но и обсуждение создаваемых задач со студентами. Разработка многих задач была не только инициирована самими студентами, но в некоторых случаях во многом и реализована ими же. В результате многие студенты университетов, не участвовавшие ранее в космической деятельности, выбрали космофизику областью своей специализации. Одним из, несомненно, замечательных результатов проведения космофизических школ стала практическая реализация возможности для студентов российских вузов создавать и защищать дипломные работы под руководством ведущих ученых МГУ или при их активном участии в качестве научных консультантов. За прошедшие годы было успешно защищено более полусотни дипломных работ. Проведение космофизических школ доказало свою эффективность и продемонстрировало возможность активного привлечения традиционно “некосмических” университетов к космической деятельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микроспутник Университетский–Татьяна успешно функционировал на орбите больше двух лет. Для работы в космических условиях на борту микроспутников МГУ Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2 была разработана и создана научная аппаратура, способная работать в условиях открытого космоса и выдерживающая большие дозы радиации. Как электроника детекторов, так и фотосенсоры продемонстрировали стабильность в течение всего срока службы ИСЗ.

На основе экспериментальных данных с микроспутника Университетский–Татьяна были проведены исследования особенностей динамики потоков заряженных частиц в различных областях околоземного космического пространства.

– Исследование границ проникновения СКЛ в магнитосферу Земли во время солнечных событий: сравнительный анализ временнóго хода границ проникновения в магнитосферу Земли солнечных протонов для двух периодов геомагнитной возмущенности показал следующее:

• граница проникновения СКЛ может следовать, но может и не следовать за изменением величины *Dst*-вариации на главной фазе геомагнитной бури;

• при различии в динамике движения ГП и величины *Dst*-вариации наблюдается корреляция динамики ГП с вращением B_z-компоненты с южного на северное направление и обратно;

• при дальнейшем уменьшении величины *Dst*-вариации, сохранении южного направления B_z-компоненты, но уменьшении величины давления солнечного ветра наблюдается движение границ проникновения СКЛ к большим широтам.

– Исследование вариаций потоков релятивистских электронов в области радиационных поясов Земли: сравнительный анализ во время двух периодов геомагнитных возмущений выявил наличие особенностей динамики потоков в зависимости от предыстории событий, изменения давления (или скорости) солнечного ветра и мощности геомагнитного возмущения.

– Исследование пространственного распределения и спектров потоков релятивистских электронов на малых высотах на $L < 2$: показано, что потоки электронов на $L < 2$ наблюдаются регулярно, но распределены в пространстве неоднородно (в основном лежат в интервалах $L < 1.2$, $L \sim 1.2$–1.4 и $L \sim 1.6$–1.9). Спектры потоков в этих областях подобны друг другу и имеют излом на энергии ~1 МэВ.

Для экспериментов на микроспутниках Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2 по исследованию свечения атмосферы были разработаны детекторы нового типа: детекторы УФ-излучения в области длин волн 240–400 нм и красного цвета – 610–800 нм, способные измерять временной профиль кратковременных вспышек. Важным преимуществом детекторов является их способность работать не только при малом фоне свечения ночной, не освещенной Луной атмосферы, но и при полнолунии, а также в районах овала полярных сияний и на дневной стороне. Стабильность работы

фотосенсоров была обеспечена благодаря выбору ФЭУ с мультищелочным фотокатодом и цифровой регулировкой усиления ФЭУ.

Главным итогом изучения транзиентных явлений в атмосфере стало выявление особенностей глобального распределения событий. Показано, что:

– 80% событий происходит вблизи экватора на широтах от 30° СШ до 30° ЮШ (данные микроспутника Университетский–Татьяна);

– частота (число событий в единицу времени на единицу площади) умеренно ярких вспышек над материками значительно выше, чем над океаном (первые данные микроспутника Университетский–Татьяна-2), наблюдаются вспышки в безоблачных районах;

– доля событий над океанами значительно превышает долю, наблюдаемую для молниевых разрядов в области грозовых формирований в атмосфере;

– частота ярких вспышек зависит от фазы Луны, самые яркие вспышки наблюдаются в полнолуние.

Новые экспериментальные сведения о непродолжительных (длительность около миллисекунды) атмосферных вспышках УФ-излучения – их появление в безоблачных районах, большой процент ярких вспышек над океанами, корреляция частоты ярких вспышек с фазой Луны – требуют дальнейших исследований.

Успешное выполнение программы создания и запуска микроспутников Университетский–Татьяна и Университетский–Татьяна-2 Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова доказало возможность реализации малобюджетных космических университетских программ, способных выполнять целенаправленные, актуальные исследования космической среды в короткие, 2–3 года, сроки. При этом временнóй фактор играет исключительную роль в космическом образовании студентов, аспирантов и молодых научных сотрудников – будущих исследователей космоса.

Авторы данной статьи выражают искреннюю благодарность сотрудникам Роскосмоса и Военно-космических сил МО РФ, обеспечившим попутный запуск наших космических аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балашов В.В., Иванов А.И., Максимов И.А. и др. Контроль радиационной обстановки на высокоапогейных космических аппаратах // Космонавтика и ракетостроение. 2003. Т. 30. № 1. С. 95–101.

Веденькин Н.Н., Дмитриев А.В., Гарипов Г.К. и др. УФ-излучение атмосферы и сопоставление вариаций его интенсивности с вариациями потоков электронов с энергиями >70 кэВ на орбите спутника (по данным ИСЗ “Университетский–Татьяна”) // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, Астрономия. 2009. № 4. С. 89–93.

Власова Н.А., Горчаков Е.В., Иванова Т.А. и др. Система мониторинга радиационных условий в магнитосфере Земли на российских космических аппаратах связи, навигации и телевидения // Космич. исслед. 1999. Т. 37. №3. С. 245–255.

Власова Н.А., Павлов Н.Н., Панасюк М.И. и др. Некоторые особенности проникновения солнечных космических лучей в магнитосферу Земли // Космич. исслед. 2011. в печати.

Гарипов Г.К., Хренов Б.А., Лубсандоржиев Б.К. и др. Фотоэлектронные умножители в фотоприемнике орбитального детектора флуоресцентного излучения ШАЛ // ПТЭ. 2005а. № 1. С. 108–111.

Гарипов Г.К., Панасюк М.И., Тулупов В.И. и др. Вспышки ультрафиолетового излучения в экваториальном районе Земли // Письма в ЖЭТФ. 2005б. Т. 82. № 4. С. 204–206.

Гарипов Г.К., Панасюк М.И., Рубинштейн И.А. и др. Детектор ультрафиолетового излучения научно-образовательного микроспутника МГУ “Университетский–Татьяна” // ПТЭ. 2006. № 1. С. 135–141.

Гарипов Г.К., Климов П.А., Морозенко В.С. и др. Временные и энергетические характеристики УФ вспышек в атмосфере по данным спутника “Университетский–Татьяна” // Космич. исслед. 2011. в печати.

Космический практикум. Ред. Ковтюх А.С. М.: УНЦ ДО, 2005. 181 с.; 2-е изд. М.: Университетская книга. 2006. 189 с.

Космофизика-2007. Электронное учебное пособие / Ред. Журавлев В.М. Ульяновский государственный университет. 2007.

Панасюк М.И., Кузнецов С.Н., Лазутин Л.Л. и др. Магнитные бури в октябре 2003 года // Космич. исслед. 2004. Т. 42. № 5. С. 509–554.

Садовничий В.А., Панасюк М.И., Бобровников С.Ю. и др. Первые результаты исследования космической среды на спутнике “Университетский–Татьяна” // Космич. исслед. 2007. Т. 45. № 4. С. 291–305.

Тверская Л.В., Тулупов В.И. Наблюдения на высоте 500 км свечения атмосферы в полосе 3914 Å в низкоширотных областях // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т. 24. № 4. С. 695–697.

Тверская Л.В. О границе инжекции электронов в магнитосферу Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. № 5. С. 864–869.

Шеффер Е.К. Ночное свечение атмосферы в линии кислорода λ1304 Å на низких геомагнитных широтах // Космич. исслед. 1968. Т. 9. С. 74–79.

Хренов Б.А., Гарипов Г.К. Транзиентные электромагнитные явления в атмосфере Земли // Модель космоса. Москва: КДУ, 2007. Т. 1. 872 с.

Хренов Б.А., Гарипов Г.К., Климов П.А. и др. Быстрые вспышки электромагнитного излучения в верхней атмосфере // Космич. исслед. 2008. Т. 46. С. 27–36.

Carlson B.E., Lehtinen N.G., Inan U.S. Observation of terrestrial gamma-ray flash electrons // AIP Conf. Proc. 2009. V. 1118. P. 84–91

Christian H.J., Blakeslee R.J., Boccippio D.J., et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. P. ACL.4-1. ID. 4005. DOI.10.1029/2002JD002347.

Feynman J., Spitale G., Wang J. Interplanetary proton fluence model: JPL 1991 // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. № A8. P. 13281–13294.

Feldstein Ya.I., Starkov G.V. The auroral oval and the boundary of closed field lines of geomagnetic field // Planet. and Space Sci. 1970. V. 18. P. 501–508.

Fishman G.J., Bhat P.N., Mallozzi R., et al. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin // Science. 1994. V. 264. P. 1313–1316.

Garipov G.K., Khrenov B.A., Panasyuk M.I., et al. UV radiation from the atmosphere: Results of the MSU "Tatiana" satellite measurements // Astroparticle Physics. 2005. V. 24. P. 400–408.

Garipov G.K., Khrenov B.A., Panasyuk M.I. Correlation of atmospheric UV transient events with lunar phase // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L. 10807. doi: 10.1029/2007GL032679.

Garipov G.K., Khrenov B.A., Klimov P.A., et al. Program of transient UV event research at Tatiana-2 satellite // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. doi: 10.1029/2009JA014765.

Grigoryan O.R., Panasyuk M.I., Petrov V.L., et al. Spectral characteristics of electron fluxes at L < 2 under the radiation belts // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 1523–1526.

Hsu R.R., Chen A.D., Kuo C.-L., et al. On the global occurrence and impacts of transient luminous events (TLEs) // AIP Conf. Proc. 2009. V. 1118. P. 99–107.

Khrenov B.A., Panasyuk M.I. Program of UHECR study with TUS/KLYPVE space detectors // Proc. Workshop on Observing of Extremely High Energy Cosmic Ray from Earth and Space. AIP Conf. Proc. Melville. N.Y., 2001. V. 566. P. 57–75.

Lethbridge M. Relationship between thunderstorm frequency and lunar phase // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 5153.

Mende S.B., Frey H.U., Su H.T., et al. Lightning-induced electromagnetic pulses // J. Geophys.Res. 2005. V. 110. A11312, doi: 10.1029/2005JA011064.

Milikh G.M., Shneider M.N. Model of UV flashes due to gigantic blue jets // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 234013–234018.

Myagkova I.N., Kuznetsov S.N., Panasyuk M.I., et al. Solar flares, solar energetic particle events and their influence on near-Earth environment in May 2005 as observed by CORONAS-F and Universitetskiy-Tatiana spacecrafts // Sun and Geosphere. 2006. V. 1. № 2. P. 32–36.

Myagkova I.N., Panasyuk M.I., Lazutin L.L., et al. December 2006 solar extreme events and their influence on the near-Earth space environment: "Universitetskiy-Tatiana" satellite observations // Adv. Space Res. 2009. V. 43. P. 489–494.

Nagata K., Kohno T., Murakami H., et al. Electron (0.19–3.2 MeV) and proton (0.58–35 MeV) precipitations observed by OHZORA satellite at low latitude zones L = 1.6–1.8 // Planet. and Space Sci. 1988. V. 36. P. 591–606.

Noël S., Buchwitz M., Bovensmann H., et al. GOME and SCIAMACHY Global Water Vapor Columns // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5. P. 1835–1841.

Nymmik R.A. Probabilistic model for fluences and peak fluxes of solar particles // Radiation Measurements. 1999. V. 30. P. 287–296.

Panasyuk M.I., Bogomolov V.V., Garipov G.K., et al. Transient luminous event phenomena and energetic particles impacting the upper atmosphere: Russian space experiment programs // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A00E33, doi: 10.1029/2009JA014763.

Park J.H., Garipov G.K., Jeon J.A., et al. Obscura telescope with a MEMS micromirror array for space observation of transient luminous phenomena or fast-moving objects // Optics Express. 2008. V. 16. № 25. P. 20249–20257. doi: 10.1364/OE.16.020249

Pasko V.P. Electric jets // Nature. 2003. V. 423. P. 927.

Paulikas G.A., Blake J.B. Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit // Geophys. Monogr. AGU. Washington. D.C. 1979. V. 21. P. 180–191.

Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O'Brien T.P. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 10. P. 1529. doi: 10.1029/2002GL016513.

Sentman D.D. Effects of thunderstorms and lightning in the upper atmosphere: An overview: Chapman Conf. Effects of Thunderstorms and Lightning in the Upper Atmosphere // J. Geophys. Res. 2010. in press.

Smith D.M., Lopez L.I., Lin R.P., Barrington-Liegh C.P. Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV // Science. 2005. V. 307. № 5712. P. 1085–1088.

Voss H.D., Smith L.G. Global zones of energetic particle precipitation // J. Atmos. Terr. Phys. 1980. V. 42. P. 227–239.