

## АТМОСФЕРНЫЕ ВСПЫШКИ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ И КРАСНОМ-ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНАХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА «УНИВЕРСИТЕТСКИЙ-ТАТЬЯНА-2»

*Н. Н. Веденькин<sup>а</sup>, Г. К. Гарипов<sup>а</sup>, П. А. Климов<sup>а\*</sup>, В. В. Клименко<sup>б</sup>, Е. А. Мареев<sup>б</sup>,  
О. Мартинес<sup>с\*\*</sup>, В. С. Морозенко<sup>а</sup>, И. Парк<sup>д\*\*</sup>, М. И. Панасюк<sup>а</sup>, Е. Понсе<sup>с\*\*</sup>,  
У. Салазар<sup>с\*\*</sup>, В. И. Тулупов<sup>а</sup>, Б. А. Хренов<sup>а</sup>, И. В. Яшин<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> *Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобелевца,  
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
119991, Москва, Россия*

<sup>б</sup> *Институт прикладной физики Российской академии наук  
603950, Нижний Новгород, Россия*

<sup>с</sup> *Заслуженный автономный университет провинции Пуэбла  
Пуэбла, С.Р. 72570, Мексика*

<sup>д</sup> *Центр исследования космоса с помощью космического телескопа по технологии МЭМ, Женский университет EWha  
Сеул, 10-750, Корея*

Поступила в редакцию 8 февраля 2011 г.

С помощью комплекса научной аппаратуры, установленной на микроспутнике «Университетский-Татьяна-2», зарегистрированы миллисекундные вспышки в ультрафиолетовом (240–400 нм) и красном-инфракрасном (610–800 нм) диапазонах спектра излучения ночной атмосферы. В пределах площади атмосферы диаметром 300 км, наблюдаемой детектором, регистрируются вспышки с различным числом фотонов: от  $10^{20}$  до  $10^{26}$ . Вспышки различаются по длительности и временному профилю: от одиночных кратковременных вспышек длительностью  $\sim 1$  мс до вспышек со сложным профилем длительностью более 100 мс. У вспышек с различным числом фотонов наблюдается различное глобальное географическое распределение. Вспышки с числом фотонов менее  $10^{22}$  равномерно распределены по карте Земли. Вспышки с числом фотонов более  $10^{22}$  концентрируются вблизи экватора и над континентами. Наблюдаются серии вспышек на одном витке спутника при пролете не только над грозовыми областями, но и над безоблачными районами. Получено распределение числа вспышек по отношению числа фотонов в красном-инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах. Применительно к разрядам в верхней атмосфере, в свечении которых доминирует излучение в первой и второй положительных системах полос молекулярного азота ( $1PN_2$  и  $2PN_2$ ), это распределение эквивалентно распределению вспышек по высотам в атмосфере. Наблюдаемое отношение числа фотонов во вспышках в красном-инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах согласуется с соответствующим расчетным отношением для электрических разрядов на высотах более 50 км. Измерения потока заряженных частиц на орбите (с пороговой энергией для электронов 1 МэВ) не дают указаний на синхронное появление вспышки в ультрафиолетовом диапазоне и всплеска в потоке частиц на орбите.

### 1. НАУЧНАЯ АППАРАТУРА СПУТНИКА «УНИВЕРСИТЕТСКИЙ-ТАТЬЯНА-2» И ДАННЫЕ О СРЕДНЕМ СВЕЧЕНИИ НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

17 сентября 2009 г. на солнечно-синхронную поллярную орбиту с высотой 820–850 км и наклоном

$98.8^\circ$  был выведен второй научно-образовательный спутник МГУ «Университетский-Татьяна-2». С помощью этого спутника проведены исследования транзиентных разрядов в ультрафиолетовом (УФ) и красном-инфракрасном (КИ) диапазонах длин волн, а также поиск корреляции этих разрядов с потоками заряженных частиц. Спутник работал в период с 20 октября 2009 г. по 16 января 2010 г.

Детекторы УФ- и КИ-излучений состоят из фото-

\*E-mail: pavel.klimov@gmail.com

\*\*O. Martinez, I. Park, E. Ponce, H. Salazar

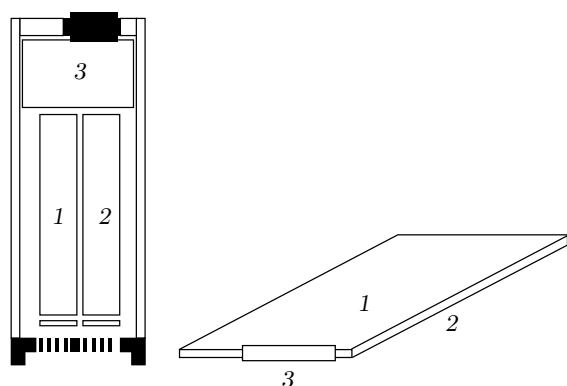


Рис. 1. Слева: детектор УФ- и КИ-излучения. 1 и 2 — фотоэлектронные умножители с соответствующими фильтрами, 3 — блок электроники. Справа: детектор заряженных частиц. 1 — сцинтилляционная пластина, 2 — световод-конвертор, 3 — фотоэлектронный умножитель

электронных умножителей (ФЭУ) типа Hamamatsu R1463 с мультищелочным катодом и ультрафиолетовым входным окном, а также блока электроники (рис. 1, слева).

Полоса пропускания окна ФЭУ ограничена светофильтрами УФС1 (УФ-излучение, длины волн 240–400 нм) и КС11 (КИ-излучение, длины волн более 610 нм) толщиной 2 мм. Следует отметить, что в области длин волн 240–400 нм эффективность конверсии фотонов в электроны на фотокатоде ФЭУ примерно постоянна, а в области длин, больших 610 нм, быстро уменьшается с ростом длины волны, см. ниже). Поле зрения  $16^\circ$  каждого из детекторов ограничено коллиматором (отверстия в пластине толщиной 2.2 мм, диаметр каждого отверстия 0.8 мм) и ориентировано в нади́р. Эффективная площадь катода ФЭУ в УФ-детекторе равна  $0.4 \text{ см}^2$ , эффективная площадь катода в КИ-детекторе уменьшена до  $0.2 \text{ см}^2$ , чтобы ожидаемый сигнал в КИ-диапазоне не выходил за пределы диапазона измерений аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Площадь атмосферы, обозреваемой с высоты орбиты 850 км, в обоих детекторах одинакова: приблизительно  $7 \cdot 10^4 \text{ км}^2$  (круг диаметром 300 км).

Детектор заряженных частиц, приходящих из полусферы, направленной в нади́р, выполнен из сцинтилляционной пластины толщиной 5 мм и площадью  $350 \text{ см}^2$ , световой сигнал с которой регистрируется с помощью ФЭУ того же типа, что в детекторе УФ и КИ (рис. 1, справа). Пороговая энергия (1 МэВ) для электронов, приходящих из выбранной полусферы, задана алюминиевым фильтром толщиной 1 мм. Частицы, приходящие из противополож-

ной полусферы, встречают значительно большее количество вещества спутника и имеют более высокий энергетический порог.

Во всех трех детекторах временной профиль сигналов от ФЭУ регистрируется идентичными каналами цифрового осциллографа с помощью 10-разрядного АЦП, измеряющего сигнал на аноде. Длительность развертки равна 128 мс, а шаг развертки равен 1 мс. Электронная система регистрации и управления каналами детекторов описана в работе [1]. В каналах детектора УФ и детектора заряженных частиц используется автоматическая цифровая система управления усилением ФЭУ (АРУ), которая удерживает сигнал анода в 16-м канале АЦП во всем диапазоне свечения атмосферы (или свечения сцинтилляционной пластины детектора заряженных частиц). Значение кода усиления ФЭУ, установившегося в результате действия АРУ, записывается каждую минуту и далее используется для определения интенсивности УФ-свечения или оценки потока заряженных частиц, пересекающих площадь сцинтилляционной пластины детектора заряженных частиц. Постоянная времени АРУ ( $\sim 0.2 \text{ с}$ ) превышает длительность ожидаемых вспышек (транзиентных событий), так что в течение регистрации вспышки ФЭУ работает с постоянным усилением, в линейном режиме в пределах диапазона работы АЦП.

На рис. 2 показана глобальная карта интенсивности УФ-свечения атмосферы в безлунные ночи, снятая в период с 20 октября 2009 г. по 16 января 2010 г. Видны наиболее «темные» районы Земли в УФ-свечении (интенсивность УФ-излучения  $I_{uv} = 3\text{--}5 \cdot 10^7 \text{ фот./см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$  над океанами, над пустыней Сахара) и наиболее «светлые» районы ( $I_{uv} = 1\text{--}2 \cdot 10^8 \text{ фот./см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$  над США, Европой и другими районами, связанными с человеческой деятельностью). С увеличением фазы луны растет уровень УФ-излучения, рассеянного от атмосферы и от облачного покрова. При полной луне  $I_{uv} \sim 10^9 \text{ фот./см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$ . При пролете в области терминатора измеряемая интенсивность УФ-излучения увеличивается до значений порядка  $10^{12} \text{ фот./см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$  и далее на дневной стороне достигает значений порядка  $10^{15} \text{ фот./см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$ .

Полученная карта интенсивности потока электронов на орбите с пороговой энергией 1 МэВ показана на рис. 3. Заметим, что измерения потока заряженных частиц проводятся как на ночной, так и на дневной сторонах Земли и поэтому заполнение карты данными на рис. 3 отличается от вида данных рис. 2, где интенсивность УФ-свечения приведена только для ночной стороны.

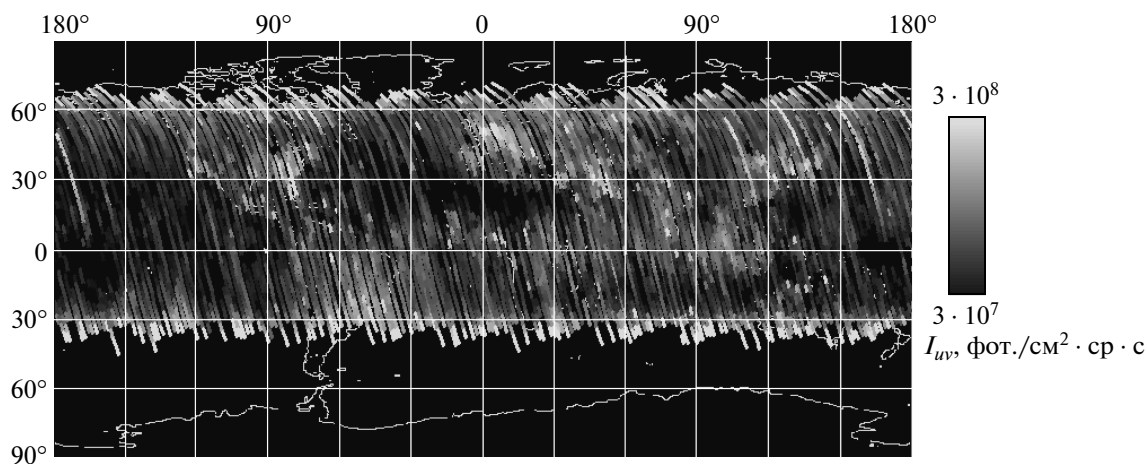


Рис. 2. Карта свечения ночной атмосферы в УФ-диапазоне в безлунные ночи. Шкала интенсивности свечения представлена справа

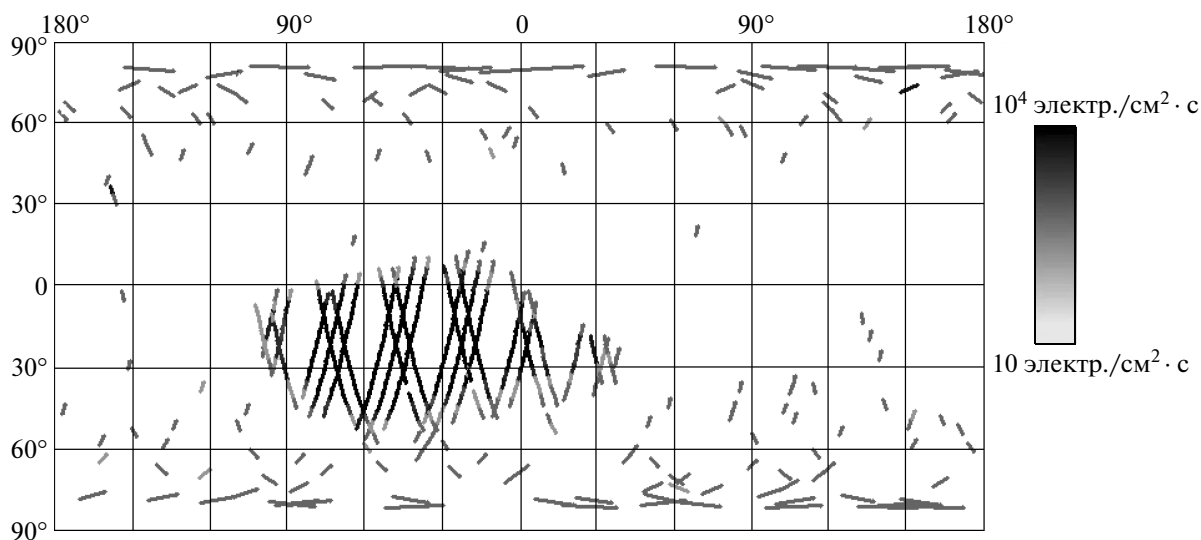


Рис. 3. Карта интенсивности заряженных частиц, регистрируемых детектором частиц на орбите

На карте рис. 3 выделяется область южно-атлантической аномалии (ЮАА), где значения интенсивности регистрируемого потока электронов и протонов на протяжении тысяч километров вдоль траектории спутника превышают значения в других районах Земли. На высоких широтах, соответствующих координатам «возврата» частиц внешнего и внутреннего радиационных поясов, движение заряженных частиц происходит в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного поля, и площадь детектора при измерении этих частиц мала. Пример осциллограммы сигнала детектора при прохождении участка орбиты в районе ЮАА с координатами

42° ЗД, 25° ЮШ показан на рис. 4. Временной профиль осциллограммы с наблюдаемыми пиками сигнала на фоне статистически флуктуирующего среднего уровня сигнала объясняется разницей в ионизации вещества сцинтилляционной пластины электронами и протонами. Интенсивность электронов с пороговой энергией 1 МэВ в области ЮАА ( $\sim 10^3$  электр./см<sup>2</sup> · с) на порядок больше интенсивности протонов с пороговой энергией 14 МэВ, поэтому через пластину площадью 350 см<sup>2</sup> за миллисекунду проходит несколько электронов и отдельные протоны.

Электроны с энергией, большей 1 МэВ, являют-

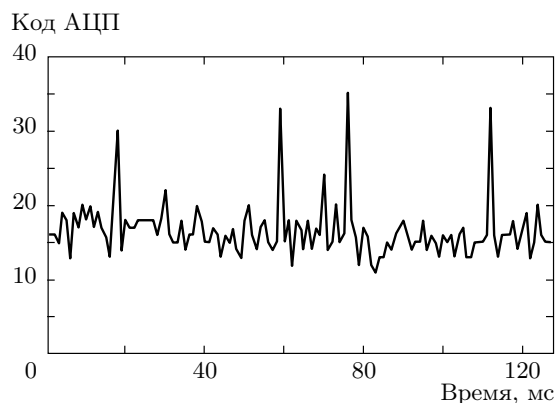


Рис. 4. Пример оциллограммы детектора заряженных частиц, регистрирующего сигналы в районе ЮАА

ся релятивистскими и в сцинтилляционной пластине толщиной  $0.5 \text{ г/см}^2$  несколько электронов выделяют «стандартную» энергию с кодом АЦП  $N = 16$ . Отдельные протоны с энергией, большей пороговой ( $14 \text{ МэВ}$  для  $1 \text{ мм}$  алюминия), выделяют в сцинтилляционной пластине энергию, большую, чем средний поток электронов. Поэтому оциллограмма сигнала от детектора заряженных частиц выглядит так, как на рис. 4: регистрируется непрерывный фон от потока электронов на уровне  $N \sim 16$  и пики от отдельных протонов с  $N \gg 16$ .

Для регистрации кратковременных вспышек излучения и всплесков интенсивности заряженных частиц все три развертки цифрового осциллографа запускаются одновременно по сигналу вспышки в УФ-детекторе. Каждую минуту отбирается одно событие с наибольшей амплитудой УФ-сигнала за время интегрирования  $1 \text{ мс}$  и записываются данные о временном профиле события в течение  $128 \text{ мс}$  в двух (УФ и КИ) диапазонах излучения и в сцинтилляционной пластине детектора заряженных частиц для передачи на Землю.

Научная аппаратура спутника «Университетский-Татьяна-2» (далее будем называть его для краткости «Татьяна-2») в сравнении с аппаратурой первого спутника того же класса «Университетский-Татьяна» (далее «Татьяна-1») [2, 3] обладает новыми возможностями для изучения кратковременных атмосферных вспышек. С помощью приборов «Татьяны-1» было измерено широтное распределение атмосферных вспышек [4, 5] и было показано, что УФ-вспышки сконцентрированы в районе экватора, а их временные и энергетические характеристики близки к характеристикам вспы-

шек, связанных с электрическими разрядами в верхней атмосфере [6]. На спутнике «Татьяна-2» при отборе вспышек с частотой  $1 \text{ мин}^{-1}$  появилась возможность изучать распределение вспышек не только по географической широте, но и вдоль одного меридиана.

Наличие КИ-детектора позволяет изучать вспышки в двух спектральных диапазонах (УФ и КИ). Наличие детектора заряженных частиц с большой площадью регистрации позволяет провести поиск событий одновременного появления потока электронов на орбите и излучения в атмосфере.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВСПЫШЕК В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ И КРАСНОМ-ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНАХ

Как было сказано выше, отбор вспышек осуществлялся УФ-детектором по максимальному сигналу за период одна минута при времени интегрирования сигнала  $1 \text{ мс}$ . Отбор такого сигнала проводится по данным  $6 \cdot 10^4$  измерений и, если нет другого физически значимого явления, условие отбора выполняется за счет флуктуаций числа фотоэлектронов на катоде ФЭУ. Статистически каждую минуту ожидается появление сигнала выше уровня среднего значения на  $5\sigma$  ( $\sigma$  — среднеквадратичное стандартное отклонение числа фотоэлектронов от среднего). Для апертуры описанного выше детектора это значение соответствует числу фотонов за  $1 \text{ мс}$   $Q \sim 100$ . С ростом величины сигнала вероятность случайного появления сигнала резко уменьшается: для сигналов на уровне  $10\sigma$  ( $Q > 200$ ) ожидаемая частота крайне мала,  $10^{-5}$  в минуту. Измерения на орбите показали, что отклонения от среднего на уровне выше  $10\sigma$  уже не являются случайными. Вспышки в УФ-диапазоне с числом фотонов  $Q > 200$  регистрируются со средней частотой  $10^{-2}$  в минуту, а в некоторых районах Земли и каждую минуту.

Нестатистический характер отобранных событий подтверждается одновременным (за тот же интервал  $1 \text{ мс}$ ) появлением сигнала в детекторе КИ-излучения. В этом детекторе, который не используется для автоматического слежения за уровнем свечения атмосферы, линейное измерение сигнала проводится в более широком диапазоне значений АЦП  $N \approx 1-1024$ , чем в УФ-диапазоне ( $N \approx 50-1024$ ). Поэтому пороговые значения при отборе события с одновременным сигналом в УФ- и КИ-диапазонах различны:  $N = 50$  для УФ-диапазона и  $N = 4$  для КИ-диапазона. Заметим также, что сигнал за  $1 \text{ мс}$

в КИ-диапазоне крайне редко достигал предельных значений  $N = 1024$ , так как квантовая эффективность катода ФЭУ в этом диапазоне на порядок меньше, чем в УФ-диапазоне (см. паспортные данные примененного ФЭУ [7]).

Число фотонов во вспышке измеряется как сумма сигналов за каждую миллисекунду. Динамический диапазон числа фотонов, измеряемого за время 128 мс, примерно в 100 раз больше, чем в измерениях за миллисекундный интервал времени. Диапазон измерения числа фотонов еще более расширяется благодаря возможности измерения в условиях повышенного среднего уровня свечения атмосферы за счет работы с малым коэффициентом усиления ФЭУ. В результате за весь период работы детекторов излучения были зарегистрированы вспышки в широком диапазоне по числу фотонов  $Q = 200-10^8$ .

На рис. 5 приведены характерные примеры зарегистрированных вспышек: *а* — вспышка в виде короткого ( $\sim 1-10$  мс) импульса, который в течение 128 мс может сопровождаться подобными импульсами, но с суммарной амплитудой не более амплитуды первого импульса; *б* — вспышка из нескольких коротких импульсов, равноправных по амплитуде; *в* — вспышка с временным профилем сложной формы, с общей длительностью до 128 мс.

Атмосферные вспышки удобно характеризовать числом фотонов  $Q_a$ , излученных в атмосфере. В нашем случае источник излучения находится в атмосфере на расстоянии  $R$  (высота орбиты спутника  $R \approx 800$  км), так что число фотонов  $Q$  в апертуре детектора связано с числом фотонов  $Q_a$ , излученных источником, соотношением

$$Q_a = Q \cdot 4\pi R^2 / S, \quad (1)$$

где  $S$  — рабочая площадь катода ФЭУ. Для УФ-детектора  $S = 0.4 \text{ см}^2$ ,  $Q_a/Q = 2.2 \cdot 10^{17}$ . Для КИ-детектора  $S = 0.2 \text{ см}^2$ ,  $Q_a/Q = 4.4 \cdot 10^{17}$ . Следует подчеркнуть, что число фотонов  $Q_a$  является лишь результатом пересчета числа зарегистрированных фотонов  $Q$  в детекторе, имеющем ограниченную апертуру наблюдения. Если пространственные размеры вспышки выходят за рамки апертуры, то истинное число фотонов во вспышке может быть больше измеренного значения  $Q_a$ .

Иногда важно знать энергию  $E$ , выделенную в УФ- или КИ-излучение во время вспышки в атмосфере. Эта энергия пропорциональна числу фотонов  $Q_a$ :

$$E = \varepsilon Q_a, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — средняя энергия фотонов (для УФ-диапазо-

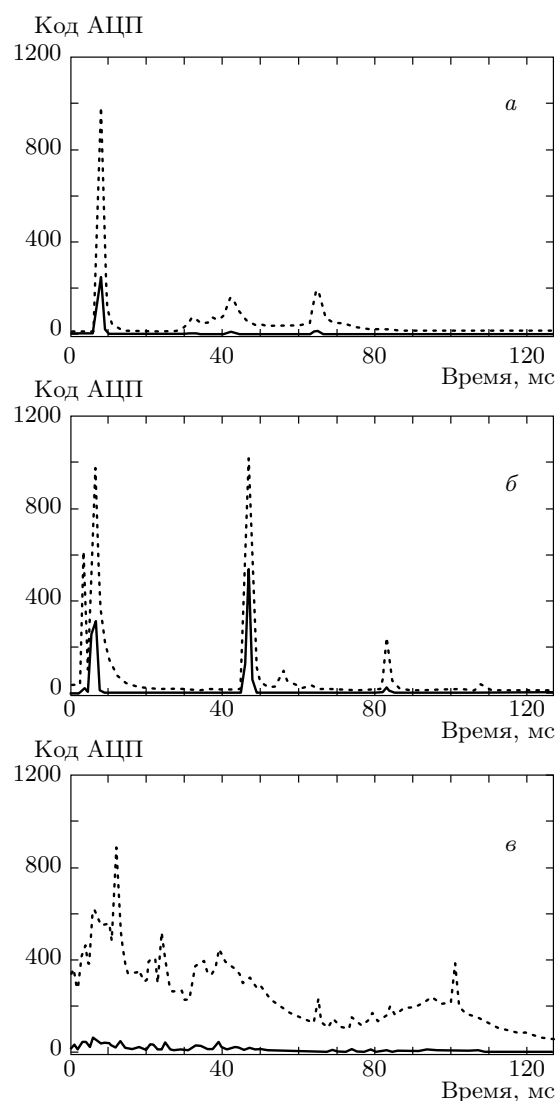


Рис. 5. Примеры зарегистрированных вспышек с различным временным профилем (см. текст). Пунктирные кривые — профили сигнала в УФ-диапазоне. Сплошные линии — профили сигнала в КИ-диапазоне

на  $\varepsilon = 3.5 \text{ эВ} = 5.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ , для КИ-диапазона  $\varepsilon = 2.8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

Вспышки с разными временными профилями имеют разное число фотонов. Короткие вспышки (1–10 мс) наблюдаются в УФ-диапазоне с числом фотонов  $Q_a = 10^{20}-10^{22}$ , более длительные вспышки (1–100 мс) — с  $Q_a = 10^{22}-10^{25}$ . Вспышки, наблюдаемые в разных частях Земли, в различных условиях освещенности атмосферы имеют разные энергии. Представление об общем распределении зарегистрированных вспышек по числу фотонов  $Q_a$  дает

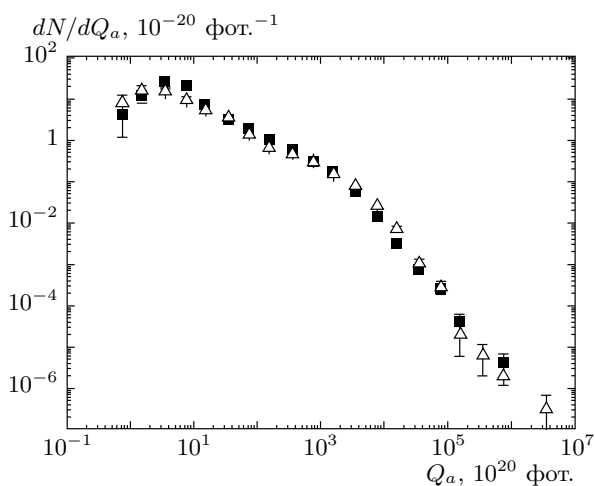


Рис. 6. Дифференциальное распределение вспышек по числу фотонов  $Q_a$ .  $\Delta$  — число фотонов в КИ-диапазоне,  $\blacksquare$  — в УФ-диапазоне

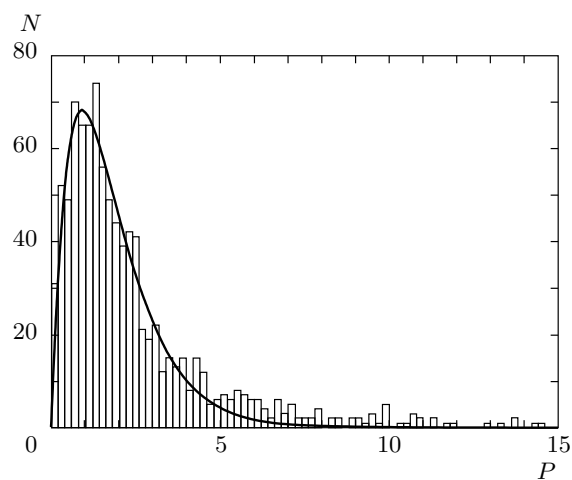


Рис. 7. Распределение вспышек по отношению  $P$  числа фотонов в КИ-диапазоне к числу фотонов в УФ-диапазоне

рис. 6, где приведено экспериментальное распределение  $dN/dQ_a$  вспышек по числу фотонов в УФ- и КИ-диапазонах. В измеренном распределении вспышек по числу фотонов заметны две области: 1) область чисел фотонов  $Q_a < 10^{23}$  с максимумом при  $10^{20}$  и уменьшением частоты событий с ростом  $Q_a$  по степенному закону с показателем  $-1$ , здесь большинство вспышек принадлежит к классу коротких (длительность меньше 10 мс); 2) область чисел фотонов  $Q_a > 10^{23}$ , где распределение по числу фотонов можно описать степенным законом с показателем  $-2$  и вспышки имеют длительность десятки миллисекунд.

Интересной характеристикой наблюдаемых вспышек является отношение  $P$  числа фотонов в КИ-диапазоне к числу фотонов в УФ-диапазоне. На рис. 7 представлено распределение вспышек по отношению  $P$ , полученному для числа фотонов интегрированием по всему доступному для измерения временному интервалу 128 мс. При построении этого распределения отобраны вспышки с полным числом фотонов в УФ-диапазоне  $Q_a < 10^{24}$ , для которых эффект насыщения при измерении сигнала в УФ-диапазоне отсутствует. Полученное распределение можно аппроксимировать зависимостью

$$J(P) = 204P \exp(-1.1P) \quad (3)$$

со средним значением  $\langle P \rangle = 1.8 \pm 0.1$ .

Применительно к электрическим разрядам в атмосфере, в свечении которых доминирует излучение в первой (КИ) и второй (УФ) положительных системах полос молекулярного азота ( $1PN_2$  и  $2PN_2$ ), это

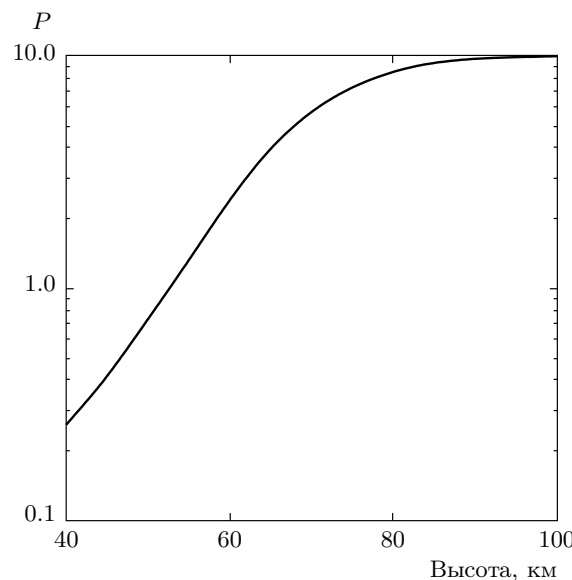


Рис. 8. Зависимость отношения  $P$  от высоты в атмосфере (расчет)

распределение эквивалентно распределению вспышек по высотам в атмосфере. На рис. 8 приведен результат расчета отношения  $P$  по формуле

$$P = \frac{Q_{aIR}}{Q_{aUV}} \approx \frac{q_{1PN_2}^*}{q_{2PN_2}^*} \frac{1 + (v_d \tau_r)_{2PN_2}}{1 + (v_d \tau_r)_{1PN_2}}, \quad (4)$$

где  $q^*$  — скорости возбуждения соответствующих переходов, которые определяются сечениями возбуждения и функцией распределения электронов по энергиям. Согласно расчетам на основе решения ки-

нетического уравнения для электронов в электрическом поле, выполненным в работе [8], непосредственно выше порога пробоя ( $E/N \sim 100$  Td) характерное значение отношения  $q_{1PN_2}^*/q_{2PN_2}^* \sim 10$ . В формуле (4)  $\tau_r(1PN_2) \approx 8 \cdot 10^{-6}$  с и  $\tau_r(2PN_2) \approx 9 \cdot 10^{-8}$  с — радиационные времена жизни возбужденных состояний [9],  $\nu_d = \sigma V_T n_m(z)$  — частота дезактивирующих столкновений ( $\sigma$  — сечение дезактивации принято равным газокинетическому, порядка  $10^{-15}$  см<sup>2</sup>),  $V_T(z) = (4/3)(8kT(z)/\pi m)^{1/2}$  — скорость относительного теплового движения молекул,  $z$  — высота,  $m$  — масса молекул, равная приблизительно 30 массам нуклона,

$$n_m(z) = 1.8 \cdot 10^{15} \exp[-(z - 70)/H]$$

— плотность молекул,  $H = 7$  км — характеристическая высота экспоненциальной атмосферы [10]. Принято также, что температура атмосферы  $T(z)$  линейно уменьшается с увеличением высоты от 273 °K на высоте 50 км до 173 °K на высоте 80 км.

Результаты приведенных расчетов с учетом использованных приближений не противоречат результатам расчетов спектрального состава излучения в электрических разрядах в верхней атмосфере [11]. Результаты расчета указывают на то, что наблюдаемые вспышки происходят при возбуждении молекулярного азота на высотах 50–80 км — в области верхней атмосферы (нижней ионосферы), где молекулярный азот остается главным компонентом атмосферы. Как видно на рис. 8, наиболее часто наблюдаются отношения  $P \approx 2-6$ , соответствующие высотам 60–70 км, а «хвост» распределения  $P > 8$  относится к высотам 80–100 км.

На рис. 9–11 представлены географические карты появления вспышек с различным числом фотонов, полученные за весь период работы детектора УФ-излучения. Заметим, что в этот период времени спутник находился в тени Земли на широтах от 60° СШ до 30° ЮШ.

Вспышки со сравнительно малым числом фотонов ( $Q_a < 10^{22}$ ) распределены равномерно по широтам, доступным для наблюдения в ночное время (60° СШ до 30° ЮШ). В поле зрения детектора эти вспышки встречаются с частотой  $1.3 \cdot 10^{-5}$  км<sup>-2</sup> · час<sup>-1</sup>.

С увеличением числа фотонов вспышки концентрируются к экватору (широты от 30° СШ до 30° ЮШ). Частота вспышек на витках, пересекающих Южную и Центральную Америку, Африку (за исключением пустыни Сахара) и Индонезию–Австралию, значительно превышает частоту вспышек над океаном. Наряду с многочисленными

**Таблица.** Распределение по числу вспышек  $N_s$  в одной серии для разных чисел фотонов  $Q_a$

$Q_a/N_s$	1	2	3	4	> 4	Всего вспышек
$10^{20}-10^{22}$	202	59	48	18	48	372
$10^{22}-10^{23}$	118	146	128	85	222	699
$> 10^{23}$	44	58	56	37	103	298

вспышками, пространственно-связанными с зонами грозовой активности, что является подтверждением уже известных результатов различных групп исследователей, полученных с помощью искусственных спутников Земли (см., например, [12, 13]), обнаружены вспышки при пролете спутников над областями «хорошей погоды». Был проведен анализ частоты появления вспышек УФ-диапазона в безоблачных и облачных районах. Использовались данные УФ-детектора за ноябрь 2009 г. и данные о границах облачности по снимкам Земли в инфракрасном диапазоне, приведенные в работе [14] с частотой один снимок за 3 ч. Оказалось, что при примерно равном времени пролета над облачными и безоблачными районами доля числа вспышек в безоблачных районах (236) из общего числа вспышек (956) значительно превышает наблюдаемую малую долю (несколько %) молний в безоблачных районах [15]. Известно, что часть высотных разрядов в атмосфере (например, гигантские голубые джеты [16]) не сопровождаются молниями и появляются в безоблачных районах. Природа вспышек в безоблачных районах мало изучена, большое абсолютное число вспышек в безоблачных районах оказывается неожиданным для существующих моделей возникновения электрических разрядов, связанных с грозовой активностью.

Обращает на себя внимание еще один результат. На отдельных витках спутника на ночной стороне Земли вспышки наблюдаются ежеминутно на протяжении 2–16 мин. В течение этого времени спутник пролетает тысячи километров над различными районами: над облаками и без облаков, над районами с грозовой активностью и над спокойными районами. Примеры серий вспышек на одном витке приведены на рис. 12.

В составе одной серии распределение вспышек по числу фотонов повторяет (в пределах статистических ошибок) распределение всех вспышек. Вероятность зарегистрировать серию событий растет с

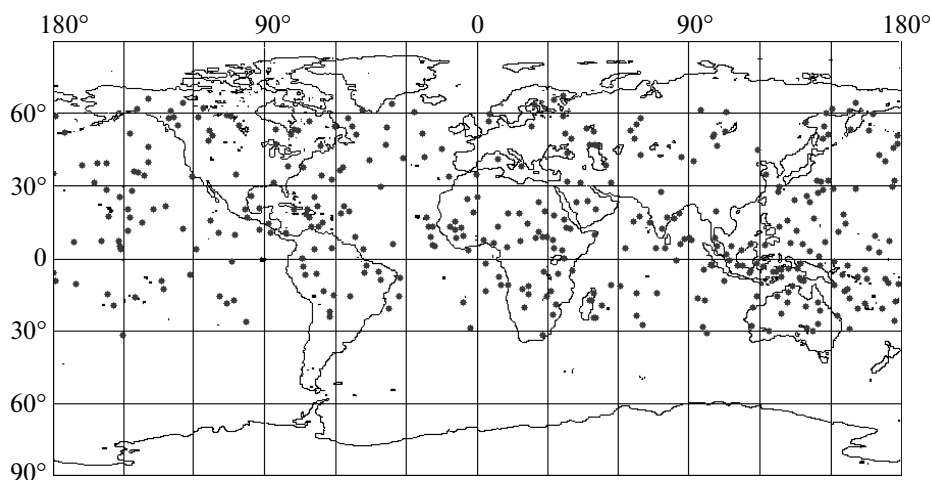


Рис. 9. Распределение вспышек в УФ-диапазоне на карте Земли, число фотонов  $Q_a = 10^{20}-10^{22}$

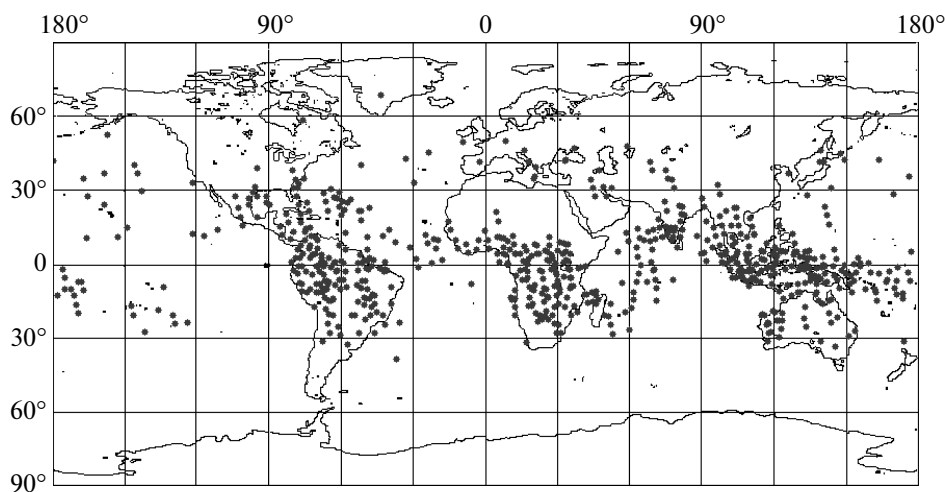


Рис. 10. Распределение вспышек в УФ-диапазоне на карте Земли,  $Q_a = 10^{22}-10^{23}$

ростом числа фотонов во вспышке. В таблице сравнивается число вспышек с заданным числом фотонов  $Q_a$ , наблюдаемое вне серии (формально число вспышек в серии  $N_s = 1$ ), с числом вспышек в составе серий с  $N_s = 2, 3, 4$  и  $N_s > 4$ .

Видно, что вспышки с небольшим числом фотонов  $Q_a = 10^{20}-10^{22}$  часто встречаются вне серий (54%), а вспышки с большим числом фотонов ( $Q_a > 10^{23}$ ) чаще встречаются в составе серий (83–85%). С ростом числа фотонов во вспышке увеличивается длина серии: доля серий с  $N_s > 4$  растет от 13% при  $Q_a = 10^{20}-10^{22}$  до 35% при  $Q_a > 10^{23}$ .

Ежeminутное наблюдение вспышек в апертуре УФ-детектора в течение нескольких минут соответствует средней частоте событий около  $5 \text{ мин}^{-1}$  или

средней интенсивности событий  $0.004 \text{ км}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ . Данные о частоте молний [17] показывают, что на Земле есть районы (Центральная Африка, Индонезия, Южная Америка), где частота молний достигает таких значений. Именно в этих районах наблюдаются и серии вспышек. Неожиданной является регистрация вспышек в той же серии за пределами этих районов, в безоблачных районах и над океаном (рис. 12). Наблюдение серий вспышек указывает на существование условий для генерации электрических разрядов в атмосфере на масштабах, значительно превышающих грозовые образования.

Анализ данных об энергии, выделяемой частицами в сцинтилляционной пластине детектора заряженных частиц, показал, что синхронно с зареги-



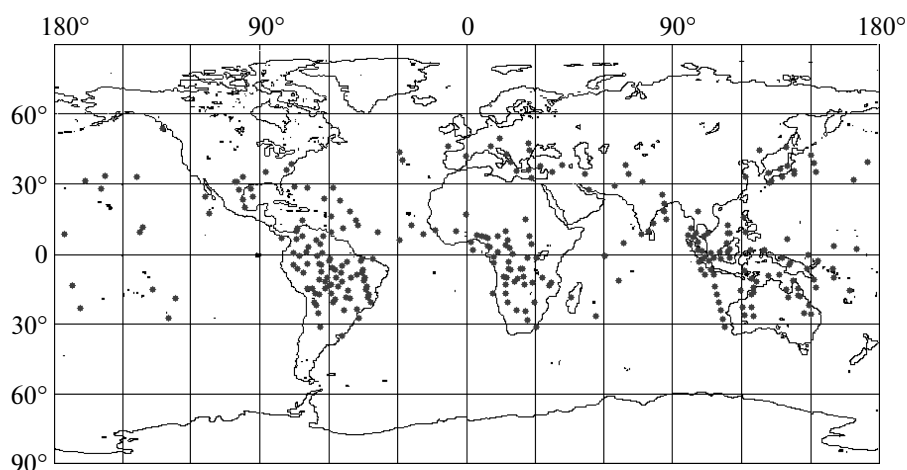


Рис. 11. Распределение вспышек в УФ-диапазоне на карте Земли,  $Q_a \geq 10^{23}$

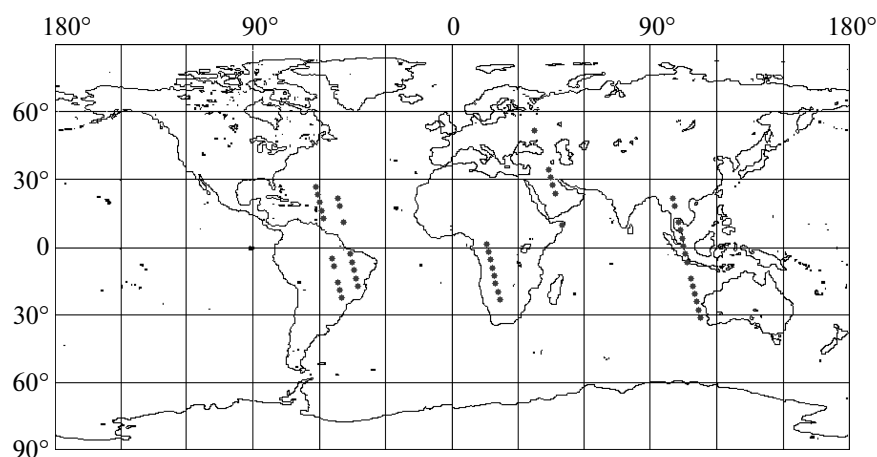


Рис. 12. Примеры серий вспышек на одном витке спутника. События 26.10.2009, UT 00:00–00:11 и 17.11.2009, UT 00:33–00:47 над Южной Америкой; событие 4.12.2009, UT 19:49–19:55 над Африкой; событие 6.12.2009, UT 17:33–17:45 над Саудовской Аравией и событие 25.10.2009, UT 13:48–14:03 над Индонезией

стрированными вспышками в УФ- и КИ-диапазонах не наблюдаются всплески потока электронов, приходящих из атмосферы. Всплески потока электронов ожидаются при большом числе электронов, ускоренных в атмосферном электрическом разряде [18, 19]. Вместе с тем магнитное поле Земли не позволяет большинству ускоренных электронов следовать прямым путем к детектору на орбите, направленному в нади́р и регистрирующему вспышку УФ- и КИ-излучения. Оценки показывают, что на широтах  $0\text{--}30^\circ$  магнитное поле отклоняет электроны высокой энергии (десятки МэВ) в сторону от спутника на сотни километров и поэтому наши данные об отсутствии электронов в момент регистрации радиацион-

ной вспышки не отрицают присутствие электронов высокой энергии в разряде, ответственном за наблюдаемое УФ- и КИ-излучение.

Интересно сравнить наблюдаемую в настоящей работе в атмосферных вспышках энергию потока фотонов в УФ-диапазоне с энергией во вспышках гамма-квантов, наблюдавшуюся в экспериментах BATSE и RHESSI [20]. По данным [20] энергия в потоке гамма-квантов около 1 кДж, что во много раз меньше энергии в потоке УФ-фотонов: согласно рис. 6 число фотонов в самых мощных вспышках достигает значений  $10^{24}\text{--}10^{26}$ , что соответствует энергии излучения в УФ-диапазоне 0.5–50 МДж.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс приборов на спутнике «Татьяна-2» позволил получить новые данные о кратковременных (от 1 до 128 мс) вспышках УФ- и КИ-свечения ночной атмосферы Земли. Детекторы УФ- и КИ-излучения работали с большей частотой срабатывания от вспышек, чем детектор УФ-излучения на спутнике «Татьяна-1». В настоящей работе выделены вспышки с «небольшим» числом УФ-фотонов, излучаемых в атмосфере,  $Q_a \sim 10^{20}$ – $10^{22}$ . Главное отличие этих вспышек в том, что они распределены равномерно по области наблюдения. Для выяснения природы этих вспышек требуется дальнейшее исследование, в первую очередь измерение пространственного размера вспышек. Сам факт существования вспышек УФ-излучения, равномерно распределенных по атмосфере Земли и близких по величине сигнала к среднему фону свечения ночной атмосферы, важен для планирования экспериментов по изучению космических лучей предельно высоких энергий по флуоресценции атмосферы. Детектором космических лучей предельно высокой энергии ТУС [21] с площадью обзора атмосферы  $10^4$  км<sup>2</sup> такие вспышки, встречающиеся с частотой  $1.3 \cdot 10^{-5}$  км<sup>-2</sup> · час<sup>-1</sup>, будут регистрироваться с частотой 0.13 час<sup>-1</sup>, что на два порядка чаще, чем полезные события от космических лучей. Вспышки УФ-излучения с числом фотонов  $Q_a > 10^{23}$  наблюдаются преимущественно над континентами на широтах от 30° СШ до 30° ЮШ, что указывает на их генетическую связь с молниями, которые распределены в тех же районах. Наблюдаемое отношение числа фотонов во вспышках в УФ- и КИ-диапазонах указывает на то, что вспышки развиваются на больших высотах в атмосфере (> 50 км) и их следует скорее отнести к «транзистентным световым явлениям» в верхней атмосфере, а не непосредственно к свечению молний.

Интересным новым наблюдаемым явлением, которое нельзя объяснить вспышками молний, являются серии вспышек на одном витке спутника. Во многих случаях серии вспышек выходят из зоны грозных образований в безоблачные области, в области над океаном, где молнии не были зарегистрированы.

Для объяснения серий вспышек необходимо предположить, что электрическая активность грозных образований воздействует на нижнюю ионосферу (высоты 50–100 км), так что условия для генерации электрических разрядов, сопровождающихся вспышками УФ- и КИ-излучения, возникают на площадях, значительно превышающих площадь

грозной области. Такие условия сохраняются достаточно долго (не менее нескольких минут), что создает возможность для наблюдения серий вспышек на одном витке спутника. Предположение о подобном «дальнодействии» локального электромагнитного воздействия на ионосферу подтверждается в опытах по возбуждению ионосферы мощными радиопередатчиками [22].

Сравнение энергии излучения в транзистентных событиях в УФ- и КИ-диапазонах с энергией в диапазоне гамма-излучения показывает, что основная энергия излучения сосредоточена в УФ- и КИ-диапазонах.

Авторы благодарны А. В. Гуревичу за обсуждение полученных экспериментальных результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 07-02-92004-ННС, 09-02-12162-офи\_м, 10-05-01045а).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. К. Гарипов, М. И. Панасюк, И. А. Рубинштейн и др., ПТЭ **1**, 135 (2006).
2. В. А. Садовничий, М. И. Панасюк, С. Ю. Бобровников и др., Космич. исследования **45**, 273 (2007).
3. В. А. Садовничий, М. И. Панасюк, И. В. Яшин и др., Астрон. вестник **45**, № 1, 5 (2011).
4. Г. К. Гарипов, М. И. Панасюк, В. И. Тулупов, и др., Письма в ЖЭТФ **82**, 204 (2005).
5. G. K. Garipov, V. A. Khrenov, M. I. Panasyuk et al., *Astropart. Phys.* **24**, 400 (2005).
6. Б. А. Хренов, Г. К. Гарипов, П. А. Климов и др., Космич. исследования **46**, 27 (2008).
7. Hamamatsu, Data Book for PM Tubes (1998).
8. Е. А. Мареев, В. В. Клименко, в кн. *Нелинейные волны 2006*, ИПФ РАН, Нижний Новгород (2007), с. 337.
9. Р. Брюс, в кн. *Термосферная циркуляция*, Мир, Москва (1975), гл. 13, с. 309.
10. К. У. Аллен, *Астрофизические величины*, Мир, Москва (1977).
11. C. L. Kuo et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 234014 (2008).
12. S. B. Mende, Y. S. Chang, A. B. Chen et al., *NATO Science Series II*, Vol. 225, Springer (2006), p. 123.

13. A. B. Chen, C. L. Kuo, Y. J. Lee et al., *J. Geophys. Res.* **113**, A08306 (2008).
14. H. J. Christian et al., *J. Geophys. Res.* **104**, 2151 (1999).
15. Space Science and Engineering Center Images, NASA, [www.ssec.wisc.edu/data/comp/ir](http://www.ssec.wisc.edu/data/comp/ir).
16. H. T. Su et al., *Nature* **423**, 974 (2003).
17. University of Washington, <http://webflash.ess.washington.edu>.
18. B. E. Carlson, N. G. Lehtinen, and U. S. Inan, *AIP Conf. Proc.* **1118**, 84 (2009).
19. J. R. Dwyer, B. W. Grefenstette, and D. M. Smith, *Geophys. Res. Lett.* **35**, L02815, doi:10.29/2007GL032430, (2008).
20. D. M. Smith et al., *Science* **307**, 1085 (2005).
21. V. I. Abrashkin et al., *Adv. Space Res.* **37**, 1876 (2006).
22. А. В. Гуревич, *УФН* **177**, 1145 (2007).