

## АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

## **УФ-излучение атмосферы и сопоставление вариаций его интенсивности с вариациями потоков электронов с энергиями более 70 кэВ на орбите спутника (по данным ИСЗ «Университетский–Татьяна»)**

Н. Н. Веденькин, А. В. Дмитриев, Г. К. Гарипов, П. А. Клинов, В. С. Морозенко, И. Н. Мягкова, М. И. Панасюк, С. Н. Петрова, И. А. Рубинштейн, У. Салазар, С. И. Свертилов<sup>a</sup>, В. И. Тулупов, Б. А. Хренов, В. М. Шахпаронов, А. В. Широков, И. В. Яшин

*НИИ ядерной физики имени Д. В. Скobelцина, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: <sup>a</sup>sis@coronas.ru*

Статья поступила 28.01.2009, подписана в печать 13.03.2009.

Представлены данные эксперимента, в котором осуществлялись одновременные измерения ультрафиолетового излучения ночной атмосферы и потоков электронов с энергией более 70 кэВ, проведенные на борту спутника «Университетский–Татьяна». Зарегистрированы возрастания средней интенсивности УФ-излучения, которые предположительно могут быть связаны с ускорением электронов в атмосферных электрических разрядах, последующим захватом электронов геомагнитным полем и высыпанием электронов в сопряженных точках геомагнитного поля.

**Ключевые слова:** всплески ультрафиолетового излучения, электроны, овал полярных сияний.

УДК: 551.510.535. PACS: 94.05.Rx, 92.60.hw, 52.80.Mg.

### **Введение**

Как известно, интенсивность флуоресценции атмосферы, вызываемой отдельными заряженными частицами при прохождении через атмосферу, весьма мала. Выход флуоресценции пропорционален потерям энергии заряженных частиц на ионизацию, но вместе с тем зависит от плотности атмосферы. Высоко в атмосфере (высоты ~100 км, где эффективно происходит ионизация атмосферы электронами сравнительно небольших энергий (~100 кэВ), плотность вещества мала и переход возбужденных уровней молекул к основному состоянию происходит в основном радиационным путем. На малых высотах (менее 30 км) с радиационными переходами конкурируют потери возбужденной энергии молекул при их столкновениях и выход флуоресценции падает. При этом для ультрафиолетового (УФ, длины волн 300–400 нм) и красного (длины волн 620–700 нм) излучения зависимости выхода света разные. Выход УФ-излучения меньше зависит от плотности атмосферы и оказывается более определенной мерой потерь энергии частиц на ионизацию. На высотах более 100 км выход УФ и красного излучения на единицу ионизационных потерь примерно одинаков. На высотах менее 30 км УФ-свечение преобладает и составляет примерно 5 фотонов на один метр пути релятивистской частицы.

Регистрация сигнала УФ, возникающего при прохождении заряженных частиц через атмосферу на расстоянии порядка 1000 км от его источника (высота орбиты ИСЗ «Университетский–Татьяна» 950 км), возможна только тогда, когда поток заряженных частиц в поле зрения прибора достаточно велик. Такому условию удовлетворяют полярные сияния в высоких широтах, а также высыпание заряженных частиц из радиационных поясов Земли (РПЗ), происходящее на более низких широтах. Поскольку сигналы от интересующих нас источников (УФ) излучения обладают малой интенсивностью, то их наблюдение возможно только на ночной стороне

Земли. Их регистрация происходит на фоне собственного ночного свечения атмосферы (ионосферы) и рассеянного света звезд и Луны [1].

Интересной проблемой является выявление физических причин связи вариаций потоков УФ-излучения с вариациями потоков электронов с энергиями десятки–сотни кэВ, наблюдавшихся в межпланетном пространстве. Одновременные измерения обоих типов излучения, проводившиеся на ИСЗ «Университетский–Татьяна», дали широкие возможности для таких исследований.

### **1. Эксперимент**

В рамках научно-образовательной программы «МГУ-250» [2] 20.01.2005 на круговую полярную орбиту (высота 1000 км, наклонение 83°) был запущен спутник «Университетский–Татьяна». Данный спутник относился к классу микроспутников, его полная масса составляла около 31 кг, а масса научной аппаратуры 7.2 кг [3]. В состав научной аппаратуры спутника «Университетский–Татьяна» входили блоки, регистрирующие потоки заряженных частиц, блоки регистрации ультрафиолетового излучения, а также информационные блоки, обеспечивающие накопление и передачу научной информации на наземные приемные пункты.

В настоящей работе использовались данные детекторов заряженных частиц, входивших в детекторные блоки БД2 и БД3. Детектирующий элемент БД2 представлял собой поверхностью-барьерный кремниевый полупроводниковый детектор (ППД) с толщиной обедненной области ~300 мкм. Входное окно детектора защищено от света алюминиевой фольгой толщиной ~10 мкм.

В блоке БД3 для регистрации частиц использовались два полупроводниковых кремниевых детектора, установленных друг за другом. Первый детектор (ППД-1) — поверхностью-барьерный с глубиной обедненной области ~300 мкм, второй (ППД-2) — диффузионно-дрейфовый с глубиной обедненной области ~1000 мкм. Подробное описание аппаратуры, регистрировавшей заряженные

частицы в эксперименте на борту ИСЗ «Университетский–Татьяна» приведено в [3].

Помимо детекторов заряженных частиц на борту микроспутника «Университетский–Татьяна» был установлен детектор ультрафиолетового излучения (ДУФ) [3, 4]. Детектор ДУФ предназначался для измерения фона свечения атмосферы в УФ-диапазоне при длине волны 300–400 нм, измерения фонового излучения, вызываемого заряженными частицами в оптических элементах детектора, и для регистрации вспышек УФ. Блок-схема детектора представлена на рис. 1. Сенсором УФ-излучения выбран фотоэлектронный умножитель (ФЭУ).

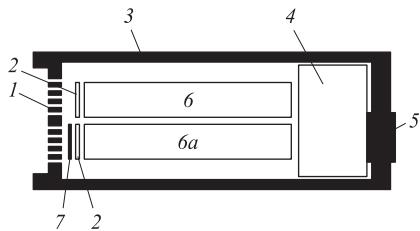


Рис. 1. Детектор ультрафиолетового излучения: 1 — коллиматор; 2 — УФ-фильтры на входных окнах ФЭУ; 3 — бокс детектора; 4 — блок электроники; 5 — разъем силового и информационного кабеля; 6 — ФЭУ с открытым окном; 6а — ФЭУ с закрытым окном; 7 — крышка

Следует отметить две основные особенности детектора ДУФ. Первая из них — ток анода ФЭУ сохраняется примерно постоянным, так как усиление ФЭУ управляет интенсивностью ультрафиолетового излучения, вторая — для регистрации излучения используются цифровые осциллографы, которые необходимы для обнаружения вспышек УФ-излучения. Данные особенности обеспечивают как широкий динамический диапазон измерения интенсивности УФ, так и возможность регистрировать вспышки УФ-излучения, используя различные временные шкалы.

Детектор имеет два ФЭУ типа R1463 фирмы «Hamamatsu» с увиолевым входным окном и мультишельочным фотокатодом. Оба ФЭУ своими полями зрения ориентированы в надир. Первый ФЭУ предназначен для изучения оптического излучения, второй ФЭУ — для регистрации света, возникающего при прохождении заряженных частиц в стеклянных элементах детектора. Поле зрения с углом обзора  $\sim 14^\circ$  формируется с помощью многоканального коллиматора толщиной 2 мм, установленного на фотокатод ФЭУ вместе с ультрафиолетовым фильтром УФС-1 толщиной 2.5 мм. Область обзора второго ФЭУ закрыта светозащитным экраном, прозрачным для космических частиц. Показания второго ФЭУ позволили оценить роль УФ-излучения при прохождении заряженных частиц космического излучения через ФЭУ. Было показано, что излучение УФ из атмосферы значительно превышает излучение от заряженных частиц в деталях ФЭУ.

ДУФ позволяет измерять интенсивность УФ-излучения от минимальных значений в ночные часы  $2 \cdot 10^7$  фотон/(см<sup>2</sup>·с·ср) до максимальных значений  $10^{13}$  фотон/(см<sup>2</sup>·с·ср) на дневной стороне [4]. Столь широкий динамический диапазон в условиях безлунных ночей позволил измерять интенсивность ультрафиолетового свечения атмосферы как в области овала полярных сияний, так и в экваториальной области, где измеряемые потоки минимальны.

## 2. Вспышки УФ-излучения по данным эксперимента на ИСЗ «Университетский–Татьяна»

В представляемом эксперименте электроникой ДУФ отбиралась самая яркая вспышка (УФ-транзистент) за виток. Изменение ее интенсивности во времени изменилось цифровым осциллографом. Использовались два канала осциллографа — продолжительностью 4 и 64 мс. Примеры временных профилей УФ-транзистентов можно найти в публикациях [3, 4]. За два года эксперимента с прибором ДУФ на борту ИСЗ «Университетский–Татьяна» было получено, что большинство ярких транзистентов концентрируется в экваториальной области (около 80% событий оказалось на широтах от 0 до  $30^\circ$  [4]).

Сравнение УФ-транзистентов, зарегистрированных прибором ДУФ в эксперименте на ИСЗ «Университетский–Татьяна», с аналогичными измерениями транзистентных событий в эксперименте ISUAL [5, 6] показывает сходство результатов ISUAL для событий типа «elve» и гигантских струй с параметрами вспышек УФ в нашем эксперименте. Более половины событий таких типов регистрировались над океаном, в отличие от событий типа «спрайт» («sprite»), которые, согласно данным ISUAL, сконцентрированы над континентами.

В ходе эксперимента с прибором ДУФ на борту ИСЗ «Университетский–Татьяна» было обнаружено, что зарегистрированные прибором ДУФ УФ-вспышки оказываются наиболее яркими и встречаются чаще при полной луне. Подробно этот эффект описывается и обсуждается в [7]. Интересно, что гигантские струи, наблюдавшиеся над морем в эксперименте [8], также происходили при полной луне.

## 3. Сравнение данных по регистрации УФ-излучения и потока электронов с энергией выше 70 кэВ на ИСЗ «Университетский–Татьяна»

На рис. 2 и 3 представлены временные вариации интенсивности УФ-излучения атмосферы (направление наблюдения в надир), измеренные одновременно с вариациями потока электронов с энергиями  $> 70$  кэВ на ИСЗ «Университетский–Татьяна», т. е. на высоте примерно 950 км. На оси абсцисс, расположенной внизу рисунков, приведено мировое время наблюдения в часах и минутах (UT). Жирной черной линией показан временной ход ультрафиолетового излучения, тонкой черной линией — временной ход потоков электронов с энергией выше 70 кэВ, серой линией — электронов с энергией 300–600 кэВ, пунктирной линией — значение  $L$ -оболочки (параметр Мак-Илвайна). Как видно из рис. 2, 29.12.2005 спутник сначала пересекает овал полярных сияний в Северном полушарии — максимум УФ-излучения наблюдался в районе 06:16 UT, на  $L = 10\text{--}12$ , а потом двигается к экватору. При этом из рис. 2 также видно, что 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 аврорального овала. Этот второй максимум УФ-излучения мы связываем с возможными выбросами квазизахваченных электронов с энергиями выше 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, после попадания спутника в область

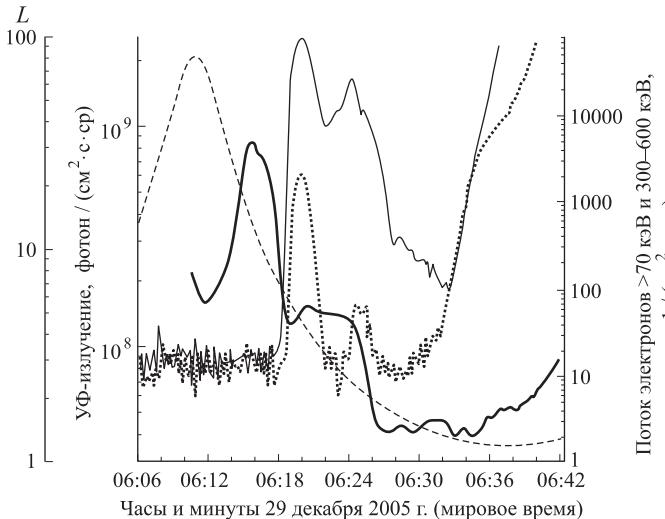


Рис. 2. Интенсивность УФ-излучения (толстая линия) и поток электронов с энергией выше 70 кэВ (тонкая черная линия), 300–600 кэВ (пунктир), параметр Мак-Илвайна  $L$  (штриховая линия) по данным ИСЗ «Университетский–Татьяна», полученным 29.12.2005

Южно-Атлантической аномалии (ЮАА), при том что был зарегистрирован резкий рост потоков электронов, возрастания потоков УФ-излучения не наблюдалось, что вполне ожидаемо, так как электроны, регистрируемые в области ЮАА, являются захваченными и не высыпаются в атмосферу.

На рис. 3 представлен другой тип пролетов (с юга на север) — 10.07.2005 спутник сначала пересекает экватор, а потом двигается к овалу полярных сияний в Южном полушарии Земли. Из рис. 3 хорошо видно, что резкое возрастание интенсивности УФ-излучения также наблюдается в области овала полярных сияний (UT 13:42,  $L = 8$ ), расположенной выше области локализации внешнего радиационного пояса Земли, с прохождением которого связаны возрастания потоков электронов с энергиями 300–600 кэВ, имеющие максимум на  $L = 4$  в 13:39 UT. Что касается отклика в интенсивности

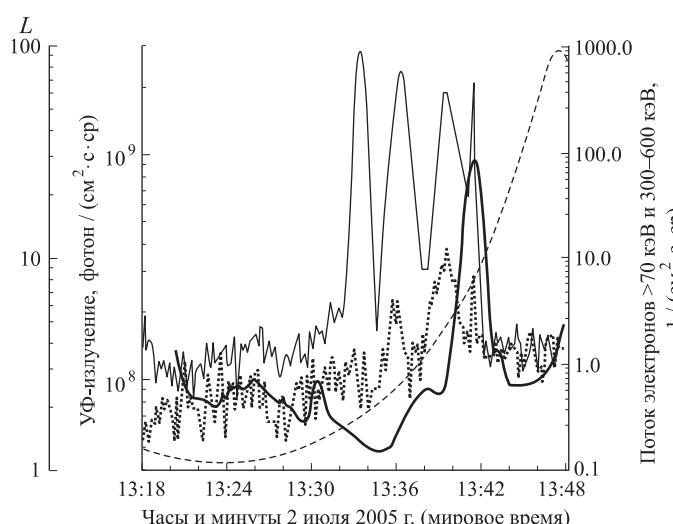


Рис. 3. Интенсивность УФ-излучения (толстая линия) и поток электронов (обозначения те же, что и на рис. 2), полученные 02.07.2005

УФ-излучения на квазизахваченные электроны, аналогичного представленному на рис. 2, максимум которых наблюдается в 13:30 UT на  $L=2.2$ , то соответствующий ему широкий максимум УФ-излучения можно разглядеть в 13:32 ( $L=3-3.2$ ). Помимо того из рис. 3 видно, что в районе геомагнитного экватора (примерно с 13:24 до 13:28 UT) имеет место синхронное возрастание как УФ-излучения, так и потоков электронов с энергиями выше 70 кэВ. Отметим, что в обоих случаях измерения проводились ночью, в отсутствие Луны.

Как видно в случаях, представленных на рис. 2 и 3, возрастания 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 возрастание потока в месте нахождения спутника и возможное возрастание потока на более высоких широтах (в конусе потерь), т. е. высыпание; здесь же регистрируется и УФ-излучение. С другой стороны, электроны, двигающиеся вдоль силовых линий геомагнитного поля, пересекают орбиту спутника на более низких широтах, чем образованное ими при взаимодействии с атмосферой УФ-излучение, регистрируемое детектором, направленным в nadir (рис. 4).

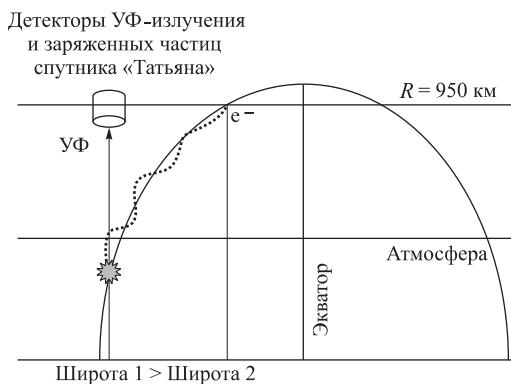


Рис. 4. Иллюстрация разницы во времени регистрации УФ-излучения и потока электронов в орбите, приборами, установленными на ИСЗ с высотой орбиты 950 км (датчик УФ-излучения смотрит в nadir)

В рассмотренном примере важно учесть, что не все электроны, присутствующие на высоте орбиты спутника (и регистрируемые детекторами, установленными на его борту), проникают в атмосферу Земли, рождая УФ-излучение. Как отмечалось выше, регистрация электронов в районе ЮАА (возрастание потоков электронов после 06:32 на рис. 2) и в области внешнего радиационного пояса Земли (максимум потока энергичных электронов — 13:38 UT на рис. 3) не сопровождается регистрацией УФ-излучения, поскольку эти электроны, захваченные геомагнитным полем, не попадают в атмосферу Земли.

Вместе с тем данные эксперимента на ИСЗ «Университетский–Татьяна» четко показывают еще одну область сравнительно интенсивного УФ-излучения ( $J_{UV} \sim 10^8$  фотон/( $\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{ср}$ )) — на широтах менее  $50^\circ$ . Это излучение на порядок величины менее интенсивно, чем в полярной зоне ( $J_{UV} \sim 10^9$  фотон/( $\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{ср}$ )), — см. распределение интенсивности УФ на карте Земли на витках, содержащих данные как в зоне полярных сияний, так и на малых широтах вблизи экватора (рис. 5).

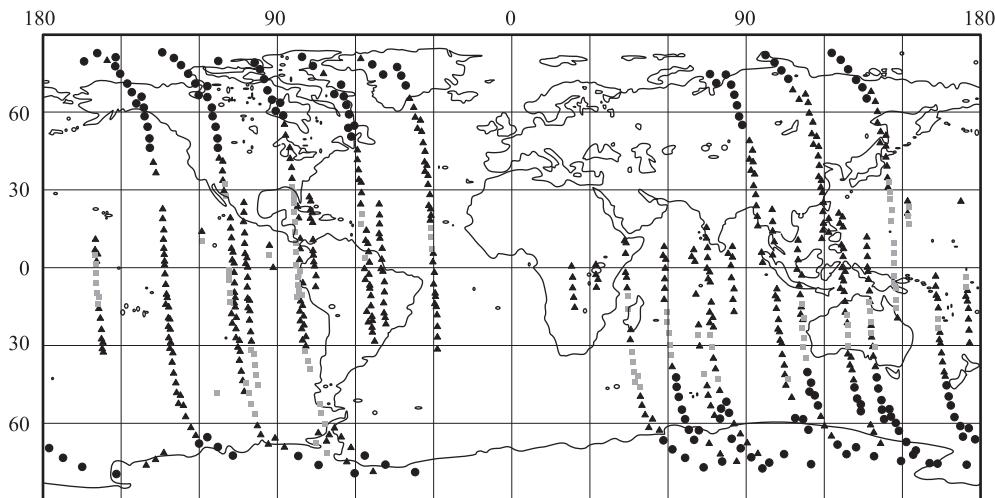


Рис. 5. Зоны различной интенсивности УФ-излучения на тех витках, где были возможны измерения в полярных широтах. Жирные кружки — интенсивность УФ  $J_{UV} > 2 \cdot 10^8$  фотон/(см<sup>2</sup> · с ·ср), треугольники — интенсивность УФ  $7 \cdot 10^7 \leq J_{UV} \leq 2 \cdot 10^8$ , квадраты —  $J_{UV} < 7 \cdot 10^7$  фотон/(см<sup>2</sup> · с ·ср)

Природа свечения атмосферы на средних широтах пока неизвестна. В качестве возможного объяснения обсуждается эффект потерь колецевого тока за счет перезарядки в ночное время и экваториальная ионосферная аномалия в освещенном полушарии. Нам представляется интересной возможность спорадического возрастания потоков электронов, ускоренных в электрических разрядах, сопровождающихся вспышками УФ. Данные об УФ-транзиентах, приведенные в предыдущем разделе, показывают, что такие разряды сконцентрированы на широтах вблизи экватора. В модели электрического разряда на «убегающих» электронах, предложенной в [9], в верхней атмосфере возможен выход ускоренных электронов в магнитосферу и образование спорадических электронных поясов с  $L = 1-2$  [10].

### Заключение

Результаты одновременного измерения ультрафиолетового излучения и потока электронов с энергиями выше 70 кэВ на ИСЗ «Университетский–Татьяна» позволяют сделать вывод, что имеется определенная корреляция между возрастаниями потоков электронов в полярной области и интенсивности УФ-излучения. При этом возрастания УФ-излучения регистрируются на более высоких широтах, чем возрастания электронов, что объясняется движением электронов вдоль силовых линий геомагнитного поля к месту максимального излучения УФ в атмосфере. Аналогичная корреляция в области Южно-Атлантической магнитной аномалии не наблюдалась, что подтверждает предположение о том, что УФ-излучение вызвано высыпающимися частицами. Вме-

сте с тем наблюдается УФ-излучение на средних и малых широтах, где высыпание частиц маловероятно. Для объяснения этого излучения делается предположение, что оно связано с образованием спорадических поясов захваченных электронов, ускоренных в электрических разрядах в верхней атмосфере. Данные о таких разрядах, концентрирующихся вблизи экватора, получены при наблюдении УФ-транзиентов (с длительностью 1–100 мс).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 07-02-92004-ННС\_а).

### Список литературы

1. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности / Под ред. К. Я. Кондратьева. Л., 1969.
2. Космический научно-образовательный проект «МГУ-250». <http://cosmos.msu.ru>.
3. Садовничий В.А., Панасюк М.И., Бобровников С.Ю. и др. // Космические исследования. 2007. **45**. С. 275.
4. Гарипов Г.К., Панасюк М.И., Рубинштейн И.А. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 1. С. 135.
5. Chern J.L., Hsu R.R. et al. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2003. **65**. P. 647.
6. ISUAL data at WEB. <http://proton.phys.ndu.edu.tw/spr>.
7. Garipov G.K., Khrenov B.A., Panasyuk M.I. // Geophys. Research Lett. 2008. **35**. P. L10807; doi: 10.1029/2007 GL032679.
8. Su H.T., Hsu R.R., Chen A.B. et al. // Nature. 2003. P. 974.
9. Гуревич А.В., Зыбин К.П. // УФН. 2001. **171**. С. 1177.
10. Lehtinen N.G. Relativistic runaway electrons above the thunderstorms: PhD dissertation, Stanford University, 2000.

**Atmospheric UV light and comparing its intensity with the electron flux variations at satellite orbit  
(`Universitetsky-Tatiana' satellite data)**

N. N. Vedenkin, A. V. Dmitriev, G. K. Garipov, P. A. Klimov, V. S. Morozenko, I. N. Myagkova, M. I. Panasyuk, S. N. Petrova, I. A. Rubinshtein, H. Salazar, S. I. Svertilov<sup>a</sup>, V. I. Tulupov, B. A. Khrenov, V. M. Shahparonov, A. V. Shirokov, I. V. Yashin

D. V. Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>sis@coronas.ru.

Simultaneous measurements of both UV radiation of night atmosphere and electron flux with the energy > 70 keV taken with the help of «Universitetsky-Tatiana» satellite show that there exist averaged UV radiation flux raises, which can be due to the electrons acceleration in the atmosphere electrical discharges with the following capturing of them by geomagnetic field and electron precipitation in the conjugated points of geomagnetic field.

*Keywords:* transient luminous events, UV airglow, polar lights.

PACS: 94.05.Rx, 92.60.hw, 52.80.Mg.

Received 28 January 2008.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2009).

**Сведения об авторах**

1. Веденькин Николай Николаевич — ст. науч. сотр.; тел.: 939-18-20/10.
2. Дмитриев Алексей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: dalex@jupiter.ss.ncu.edu.tw.
3. Гарипов Гали Карымович — науч. сотр.; тел.: 939-44-96, e-mail: garipov@eas.sinp.msu.ru.
4. Климов Павел Александрович — мл. науч. сотр.; тел.: 939-57-34, e-mail: pavel.klimov@gmail.com.
5. Морозенко Вероника Сергеевна — мл. науч. сотр.; e-mail: ver\_m@mail.ru.
6. Мягкова Ирина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: 939-44-87, e-mail: irina@srd.sinp.msu.ru.
7. Панасюк Михаил Игоревич — докт. физ.-мат. наук, профессор, директор института; тел.: 939-18-18, e-mail: panasyuk@sinp.msu.ru.
8. Петрова Светлана Николаевна — мл. науч. сотр.; e-mail: sveet@list.ru.
9. Рубинштейн Илья Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: 939-18-20.
10. Свертилов Сергей Игоревич — докт. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотр.; тел.: 939-51-60, e-mail: sis@coronas.ru.
11. Тулупов Владимир Иванович — канд. физ.-мат. наук, зав. отделом; тел.: 939-51-00/50, e-mail: tulupov@taspd.sinp.msu.ru.
12. Хренов Борис Аркадьевич — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.; тел.: 939-57-34, e-mail: bkhrenov@yandex.ru.
13. Шахпаронов Владимир Михайлович — науч. сотр.; тел.: 939-56-44.
14. Широков Андрей Владимирович — вед. программист; тел.: 939-44-96, e-mail: shirokov@eas.sinp.msu.ru.
15. Яшин Иван Васильевич — канд. физ.-мат. наук, зав. отделом; тел.: 939-57-31/18, e-mail: ivn@eas.sinp.msu.ru.