

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 551.593

**ДЕТЕКТОР ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ АУРА
НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ
ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ТИПА КУБСАТ**

© 2021 г. Е. В. Глинкин^а, П. А. Климов^{а,*}, А. С. Мурашов^а, Д. В. Чернов^а

^а Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Россия, 119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

*e-mail: pavel.klimov@gmail.com

Поступила в редакцию 15.09.2020 г.

После доработки 07.10.2020 г.

Принята к публикации 09.10.2020 г.

В НИИЯФ МГУ выполняется программа по созданию компактных детекторов для исследования атмосферы и околоземного космического пространства с борта малых космических аппаратов типа кубсат. В рамках этой программы разработан и испытан описываемый в данной статье детектор ультрафиолетового излучения атмосферы Земли АУРА. Прибор является четырехканальным фотометром на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей (к.ф.э.у.) фирмы SensL. Компактность, низкое напряжение питания и прочность – факторы, определяющие преимущества к.ф.э.у. для использования в составе наноспутников.

DOI: 10.31857/S0032816221020038

ВВЕДЕНИЕ

В связи с бурным развитием технологии создания унифицированных платформ малых космических аппаратов (наноспутников или кубсатов) стало возможным существенно сократить время разработки и запуска научной аппаратуры при условии, что она удовлетворяет требованиям по компактности, энергопотреблению и массе. В МГУ развивается программа запуска малых космических аппаратов с целью продолжения исследований околоземного космического пространства и верхней атмосферы, начатых на спутниках “Университетский-Татьяна” [1], “Университетский-Татьяна-2” [2], “Вернов” [3] и “Ломоносов” [4], но на новом технологическом уровне.

На всех перечисленных аппаратах были установлены детекторы ультрафиолетового (у.ф.) свечения атмосферы. Во всех случаях в качестве фотосенсора использовался вакуумный фотоэлектронный умножитель (ф.э.у.), который при всех достоинствах (высокая чувствительность, надежность, летная квалификация) имеет достаточно большие габариты и требует источников высокового напряжения. Эффективная площадь катода ф.э.у. в этих детекторах (апертура приема фотонов) составляла 0.4 см², а поле зрения в атмосфере равнялось 16°.

Информация о вспышках записывалась в виде временных осциллограмм. Разрешение по времени для разных миссий было различным, что позволило изучать разные типы событий (“Университетский-Татьяна” – 16 мкс и 64 мкс, “Университетский-Татьяна-2” – 1 мс, “Вернов” – 0.5 мс). Были получены географическое распределение у.ф.-вспышек, которое явным образом коррелирует с грозowymi областями, и энергетическое распределение в широком диапазоне энергий 10–10⁶ Дж. Вместе с тем, были зарегистрированы транзиентные атмосферные явления с координатами в сотни и даже тысячи км от местоположения молний – так называемые внегрозовые транзиентные оптические явления [5].

Особенный интерес вызвала регистрация на одном витке орбиты серий вспышек [6]. В таких сериях события следуют одно за другим с интервалом от 5 с до 1 мин. В некоторых из этих серий наблюдались события далеко от гроз, местоположение которых известно по данным наземных сетей локации молний. На спутнике “Ломоносов” детектор представлял собой большой телескоп с площадью зеркала 2 м². Этот прибор предназначен для регистрации гораздо более слабых у.ф.-вспышек от широких атмосферных ливней космических лучей предельно высоких энергий.

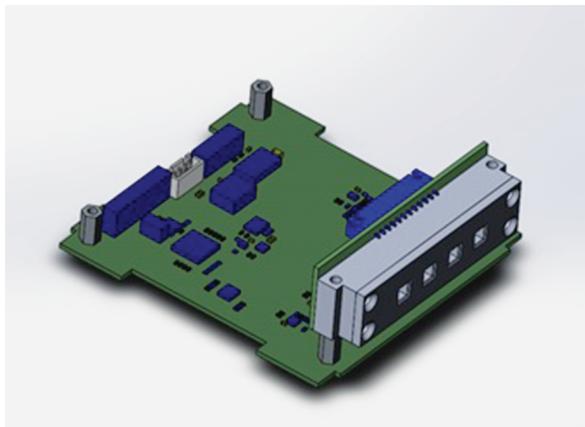


Рис. 1. 3D-модель детектора АУРА.

Дальнейшее исследование и мониторинг у.ф.-свечения атмосферы требует создания новой аппаратуры, а для ускорения разработки и запуска – выполнение ее в формате, совместимом с механическими и электрическими интерфейсами платформ типа кубсат. В качестве фотосенсоров наиболее подходящими в этом случае являются кремниевые фотоэлектронные умножители (к.ф.э.у.).

К.ф.э.у., в отличие от вакуумных ф.э.у., используемых для быстрой фотометрии, обладают рядом преимуществ, существенных для экспериментов на малых космических аппаратах. Это компактность (толщина порядка 1 мм), низкое напряжение питания (25–70 В), малый вес.

Для измерений свечения ночной атмосферы Земли и отработки технологии использования к.ф.э.у. в открытом космическом пространстве был разработан компактный прибор АУРА (англ. AURA – Atmospheric Ultraviolet RAdiation). На первом этапе отработки было решено использовать прибор с широким полем зрения и без пространственного разрешения. Основные задачи, решаемые на этом этапе: 1) проверка работоспособности методики измерения, аппаратуры и получения летной истории; 2) измерение диапазона интенсивностей в условиях работы на ночной и дневной стороне орбиты спутника в условиях отсутствия ориентации аппарата (устойчивая ориентация малых космических аппаратов задача сложная, и необходимо обеспечить работоспособность прибора в случае отсутствия точной ориентации аппарата, когда фотосенсоры могут быть направлены как на области минимальной освещенности ночного неба, так и на солнце). Первый образец научной аппаратуры АУРА был запущен на борту космического аппарата “ВДНХ-80” в июле 2019 года. В ходе летных испытаний впервые проведены измерения у.ф.-излучения атмосферы при помощи к.ф.э.у. в открытом космическом простран-

стве, показана надежность работы детектора, функционирование в широком диапазоне интенсивностей свечения (от темных участков ночной части орбиты до прямого солнечного света).

СОСТАВ ДЕТЕКТОРА АУРА

Детектор представляет собой компактный прибор (см. рис. 1) с четырьмя фотосенсорами. Из-за малых габаритов и массы детектора АУРА применение обычных ф.э.у. для регистрации светового потока крайне затруднительно. Даже самые компактные ф.э.у. требуют подключения высоковольтных источников питания с хорошей изоляцией для защиты от возникновения паразитных разрядов в открытом космосе. Кроме того, при высоком уровне засветки и случайном включении высоковольтного питания из-за какого-либо сбоя в работе электроники ф.э.у. могут выйти из строя безвозвратно.

Для устранения указанных выше проблем было решено использовать к.ф.э.у. Эти датчики являются современной альтернативой вакуумным ф.э.у. и имеют ряд преимуществ:

- широкий диапазон чувствительности от одиночных фотонов до прямого солнечного света;
- низкий уровень питающих напряжений 30–70 В;
- быстрое восстановление номинальной чувствительности при включении питания или после чрезмерной засветки;
- нечувствительность к магнитным полям;
- механическая прочность;
- высокая однородность чувствительности.

Основным недостатком у применяемых в детекторе АУРА к.ф.э.у. является относительно высокий уровень шума при комнатной температуре (и выше) за счет термоэмиссии и зависимость шума и коэффициента усиления ф.э.у. от температуры. Однако зависимость чувствительности от температуры можно учесть при обработке данных, а уровень счета темнового тока порядка 1 МГц, что не превышает ожидаемую скорость счета в областях с минимальным фоном у.ф.-излучения ночной атмосферы¹.

В детекторе АУРА применены к.ф.э.у. MicroFC-60035-SMT с чувствительной областью 6×6 мм, спектральной чувствительностью от 300 до 800 нм, максимумом спектральной чувствительности 420 нм и квантовой эффективностью до 41% при

¹ По данным измерений спутника “Татьяна-1” минимальный фон ночной атмосферы составляет $3 \cdot 10^7$ фотонов/(см² · ср · с), т.е. при квантовой эффективности к.ф.э.у. 0,4, площади 0,36 см² и телесном угле обзора ~1 ср ожидаемая частота счета ~4 МГц.

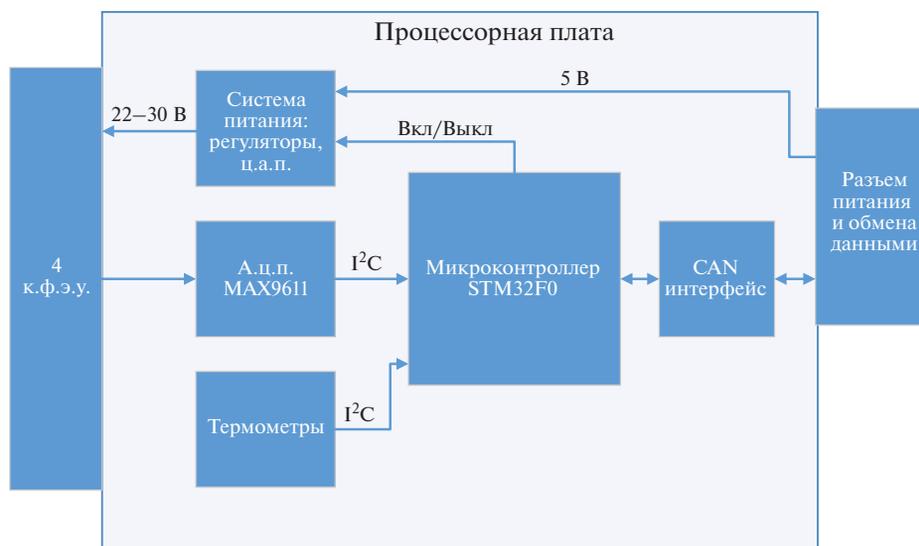


Рис. 2. Блок-схема детектора АУРА.

420 нм. Эта чувствительность достигается при напряжении питания около 29.5 В.

При напряжении питания ниже “пробивного порога” 24.5 В к.ф.э.у. начинает работать как обычный фотодиод, т.е. под действием света в к.ф.э.у. возникает э.д.с., но уже без усиления сигналов. В этом режиме возникающий в к.ф.э.у. ток пропорционален световому потоку на входном окне. Так как направление тока (полярность сигнала) совпадает с лавинным режимом, то для регистрации сигналов в обоих режимах может использоваться одна и та же измерительная электроника. Данное обстоятельство расширяет динамический диапазон измерений световых потоков почти до 10^7 .

В детекторе АУРА использованы 4 к.ф.э.у., которые смонтированы на расстоянии 12 мм друг от друга. Каждый элемент находится внутри бленды с зачерненной поверхностью и с входным отверстием 6×6 мм. Отверстие находится над к.ф.э.у. на расстоянии 14.5 мм. Таким образом, бленды ограничивают поля зрения до $\pm 22.5^\circ$, а при световом потоке, перпендикулярном поверхности к.ф.э.у., достигается максимальная чувствительность фотоприемника.

Для изучения спектральных особенностей падающего на к.ф.э.у. светового потока на трех к.ф.э.у. установлены ультрафиолетовые светофильтры УФС1, УФС5 и ФС6. Поля зрения всех фотосенсоров совпадают.

Для управления режимом работы фотоэлектронных умножителей в функциональной схеме присутствует автоматический регулятор напряжений. Запуск и остановка измерений происходит подачей команды с Земли. В процессе работы прибора все измеряемые параметры записываются

в энергонезависимую память. Содержимое памяти может быть прочитано с помощью команд прикладного протокола.

В аппаратную схему детектора АУРА входят следующие компоненты: 4 к.ф.э.у., 4 аналого-цифровых преобразователя (а.ц.п.), 5 датчиков температуры, инвертирующий регулятор постоянного тока с регулировкой выходного напряжения с помощью цифрового потенциометра, цифроаналоговый преобразователь (ц.а.п.) AD5308 для установки положительного перенапряжения, микроконтроллер.

Блок-схема детектора представлена на рис. 2.

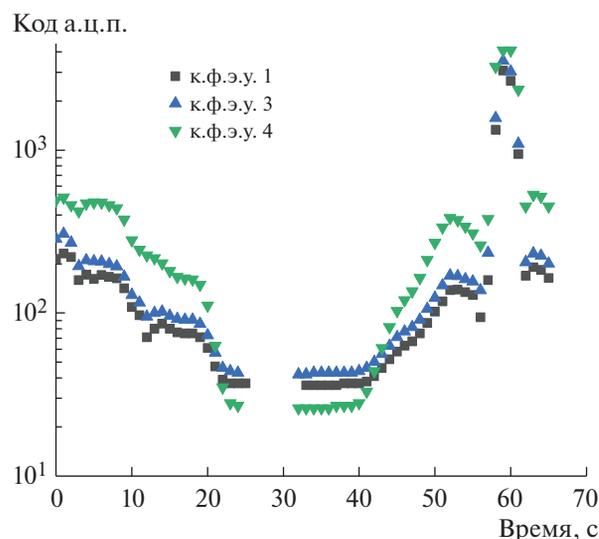


Рис. 3. Осциллограмма измерений детектора АУРА в течение сеанса 14.11.2019.

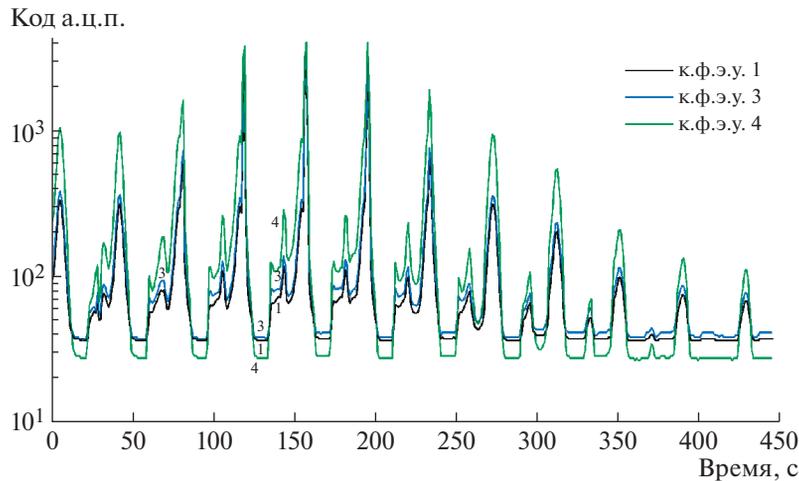


Рис. 4. Данные детектора АУРА от 26.11.2019.

Регистрация световых потоков осуществляется путем измерения тока через к.ф.э.у. Для этого использованы четыре микросхемы MAX9611, в состав которых входит токовый усилитель CSA, операционный усилитель с коэффициентом усиления $\times 1$, $\times 4$ и $\times 8$, 12-битный а.ц.п. с частотой оцифровки 2.5 МГц. Микросхема позволяет устанавливать диапазон измерения тока (напряжения на шунтирующем резисторе 100 Ом-0.1%) и считывать результаты измерений с частотой до 500 Гц через цифровой интерфейс I²C. Измерения происходят каждую секунду.

В качестве датчика температуры используется цифровой термометр DS1631AU. Точность определения температуры $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Рабочая температура от -55 до $+125^\circ\text{C}$. Выходной интерфейс данных для связи с микроконтроллером – I²C.

Питается к.ф.э.у. от отрицательного и положительного источников напряжений. Отрицательный источник на основе микросхемы инвертирующего преобразователя напряжений ADP5073 задает напряжение пробоя $V_{br} = -24.2\dots-24.7$ В для лавинных диодов в к.ф.э.у. Регулировать это напряжение можно при помощи цифрового потенциометра на микросхеме AD5245. Регулировка значения сопротивления осуществляется с контроллера по интерфейсу I²C.

Положительное значение перенапряжения $V_{ov} = 1-5$ В устанавливается на выходах 8-канального, 8-битного ц.а.п. AD5308. Выходное напряжение регулируется микроконтроллером по интерфейсу SPI. Выходной буферный усилитель этого ц.а.п. выдерживает ток до 2.5 мА. Изменение V_{ov} позволяет регулировать усиление к.ф.э.у.

Для подстройки чувствительности к.ф.э.у. к потоку излучения служит система автоматической регулировки усиления, которая имеет 4 режима,

отличающихся перенапряжением для к.ф.э.у. Возможные значения перенапряжения: 0 В (режим фотодиодов), 1.22 В и 2.44 В (для измерений интенсивности на терминаторе и при случае высокой ночной атмосферной освещенности – полнолунии) и 5 В (наиболее чувствительный режим для измерения свечения в безлунные ночи).

Обработка и хранение данных производится на микроконтроллере фирмы STmicroelectronics STM32F107R8T. Микроконтроллер, работающий на частоте 72 МГц, построен на базе ядра ARM Cortex M3. Программа, настройки режимов работы прибора АУРА и данные записываются во внутреннюю память микроконтроллера. Для связи с бортовым процессором космического аппарата используется интерфейс передачи данных – CAN.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В апреле 2019 года детектор был установлен на спутник “ВДНХ-80”. Космический аппарат успешно запущен 5 июля 2019 года. Далее представлены некоторые предварительные результаты измерений.

Первые месяцы полета спутника “ВДНХ-80” были посвящены этапу ввода проекта в эксплуатацию и испытаниям служебных систем спутника. Поэтому первые включения детектора состоялись только 14.11.2019, 19.11.2019 и 26.11.2019. Включения научной аппаратуры происходили на дневной стороне орбиты в районе пункта управления в г. Калуга.

Первое, тестовое, включение происходило 14.11.2019 без подачи питания на к.ф.э.у. на дневной стороне орбиты. В этом случае к.ф.э.у. работают как фотодиоды и рассчитаны на измерения больших потоков. Интенсивность излучения (в

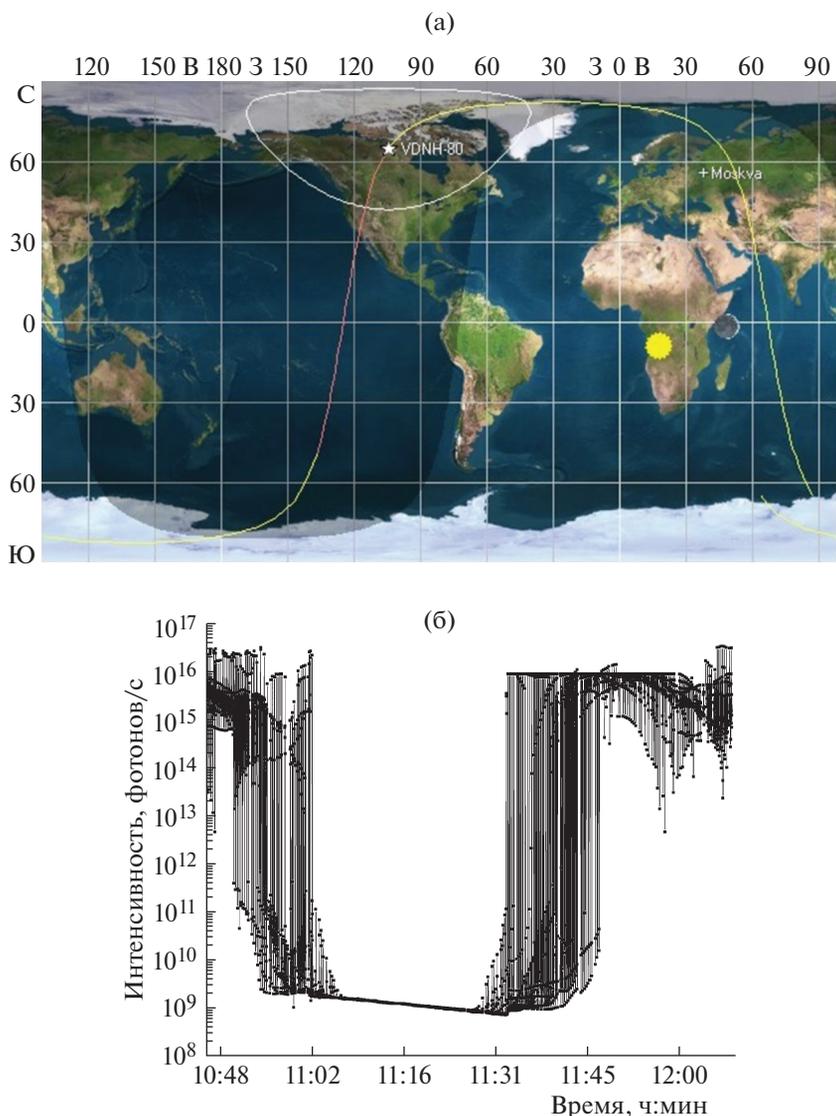


Рис. 5. Результаты измерений к.ф.э.у. 1 детектора АУРА на борту “ВДНХ-80” 26.02.2020: **а** – траектория космического аппарата, **б** – зависимость измеряемой интенсивности от времени.

кодах а.ц.п.), полученная за первый сеанс, приведена на осциллограмме рис. 3. Временное разрешение составляет 1 с.

Вариации интенсивности в основном определяются вращением спутника. Между 25 и 40 с сигнал равен темновому току, измеренному в предполетных испытаниях, следовательно, входные окна детектора направлены в сторону минимальной интенсивности свечения, и чувствительности к.ф.э.у. при отсутствии питания недостаточно. При этом в предполетных измерениях к.ф.э.у. 4 имел самое низкое значение темнового тока, равное 23 отсчетам а.ц.п. (что и наблюдается на осциллограмме).

В районе 60-й секунды измерений наблюдается максимум свечения. При пересчете кодов а.ц.п. в мощность излучения получено значение $\sim 0.14 \text{ Вт/см}^2$, таким образом, в этот момент в поле зрения детектора находилось Солнце. Это показывает, что детектор сохраняет работоспособность и возможность проводить измерения во время и после попадания прямого солнечного излучения на фотосенсор.

26.11.2019 детектор работал в течение 7 мин (11:42:25–11:49:49 UTC). Осциллограмма измерений показана на рис. 4. Данные относятся также к дневной стороне, но детектор был включен в полноценном измерительном режиме, т.е. с подачей питания на к.ф.э.у. Однако система автоматической регулировки напряжений для защиты аппара-

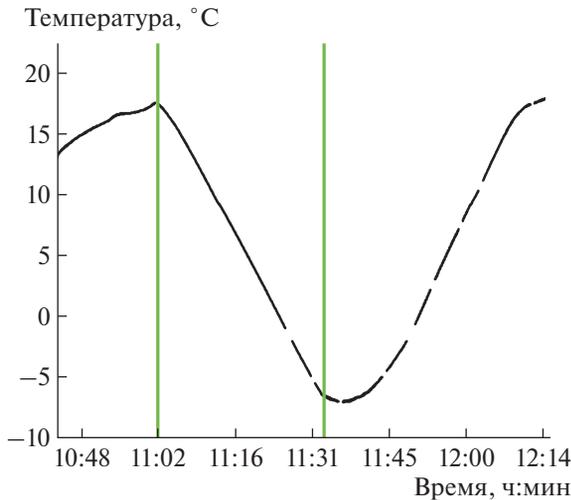


Рис. 6. Вариации температуры на плате фотосенсоров детектора АУРА в ходе измерений 26.02.2020. Вертикальными линиями показаны терминаторы (11:02–11:31 – ночная сторона орбиты).

туры при большой засветке регулирует напряжение на к.ф.э.у. таким образом, чтобы ограничивать ток на выходе фотосенсора. Видны характерные колебания интенсивности, которые, очевидно, связаны с вращением аппарата.

Следует отметить, что постоянное вращение спутника, отсутствие возможности стабилизировать аппарат и получать информацию о его ориентации составляют основную проблему при проведении измерений и интерпретации результатов. Однако эксперимент носит в основном технологический характер, связанный с проверкой работоспособности всех систем прибора в разных условиях. С этой точки зрения вращение аппарата позволило подтвердить надежность и работоспособность прибора в условиях любой освещенности фотосенсоров.

Длительные ночные измерения были проведены 26.02.2020, когда прибор был включен в течение 1.5 ч, т.е. времени полного оборота спутника вокруг Земли. Результаты измерений на ночной части орбиты приведены на рис. 5: на рис. 5а показана траектория космического аппарата, на рис. 5б – зависимость измеряемой интенсивности от времени.

На дневной части орбиты видны значительные вариации, связанные с вращением аппарата, интенсивность регистрируемого излучения составляет 10^{15} – 10^{16} фотонов/с. Затем космический аппарат пересек терминатор и летел над областью полярного свечения и антропогенных источников на территории США. На ночной части наблюдается монотонный незначительный спад сигнала, интенсивность излучения порядка 10^9 фотонов/с. Значения измеряемой интенсивности лежат суще-

ственно выше темного тока, отсутствие каких-либо значимых вариаций объясняется тем, что измерения происходят над океаном в безлунную ночь (фаза луны – 7%). При этом в ходе ночных измерений происходит уменьшение температуры (см. рис. 6), что должно приводить к увеличению коэффициента усиления к.ф.э.у. и небольшому уменьшению темного тока. Эти эффекты не видны на измеренной кривой, так как основной вклад вносит само регистрируемое излучение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения программы по запуску наноспутников в НИИЯФ МГУ разработан и испытан компактный детектор излучения ближнего у.ф.-диапазона на основе кремниевых фотоумножителей. Детектор изготовлен в 2019 году, проведены его наземная отработка и калибровки, и запущен в составе космического аппарата “ВДНХ-80” 05.07.2019. В ходе реализации эксперимента был проведен ряд сеансов измерений на дневной и ночной сторонах орбиты спутника. Показана надежная работа научной аппаратуры, несмотря на неуправляемое вращение космического аппарата, которое не позволило однозначно интерпретировать данные. Это первое использование к.ф.э.у. в экспериментах в открытом космосе по регистрации солнечного и атмосферного излучений. Удачный опыт позволил разработать второй вариант прибора – АУРА-2, который запущен в составе космического аппарата “ДЕКАРТ” в сентябре 2020 года. АУРА-2 имеет большее поле зрения и лучшее временное разрешение (10 мс). Эта работа открывает новое направление в приборостроении для малых космических аппаратов – высокочувствительные компактные детекторы у.ф.-излучений на основе кремниевых фотоумножителей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60419X0237.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sadovnichy V.A., Panasyuk M.I., Bobrovnikov S.Y., Vedenkin N.N., Vlasova N.A., Garipov G.K., Grigorian O.R., Ivanova T.A., Kalegaev V.V., Klimov P.A., Kovtyukh A.S., Krasotkin S.A., Kuznetsov N.V., Kuznetsov S.N., Muravyeva E.A., Myagkova I.N. et al. // Cosm. Res. 2007. V. 45. P. 273. <https://doi.org/10.1134/S0010952507040016>*
2. *Sadovnichy V.A., Panasyuk M.I., Yashin I.V., Barinova V.O., Vedenkin N.N., Vlasova N.A., Garipov G.K., Grigoryan O.R., Ivanova T.A., Kalegaev V.V., Klimov P.A., Kovtyukh A.S., Krasotkin S.A., Kuznetsov N.V., Kuznetsov S.N., Mu-*

- rav'eva E.A. et al.* // Sol. Syst. Res. 2011. V. 45. P. 3.
<https://doi.org/10.1134/S0038094611010096>
3. *Klimov P.A., Garipov G.K., Khrenov B.A., Morozenko V.S., Barinova V.O., Bogomolov V.V., Kaznacheeva M.A., Panasyuk M.I., Saleev K.Yu., Svertilov S.I.* // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2017. V. 56. P. 2189.
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0309.1>
 4. *Klimov P.A., Panasyuk M.I., Khrenov B.A., Garipov G.K., Kalmykov N.N., Petrov V.L., Sharakin S.A., Shirokov A.V., Yashin I.V., Zotov M.Y., Biktemerova S.V., Grinyuk A.A., Grebenyuk V.M., Lavrova M.V., Tkachev L.G., Tkachenko A.V. et al.* // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. P. 1687.
<https://doi.org/10.1007/s11214-017-0403-3>
 5. *Klimov P.A., Kaznacheeva M.A., Khrenov B.A., Garipov G.K., Bogomolov V.V., Panasyuk M.I., Svertilov S.I., Cremonini R.* // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2018. V. 15. № 8. P. 1139.
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2830656>
 6. *Garipov G.K., Khrenov B.A., Klimov P.A., Klimenko V.V., Mareev E.A., Martines O., Mendoza E., Morozenko V.S., Panasyuk M.I., Park I.H., Ponce E., Rivera L., Salazar H., Tulupov V.I., Vedenkin N.N., Yashin I.V.* // J. Geophys. Res. (Atmos.). 2013. V. 118. P. 370.
<https://doi.org/10.1029/2012JD017501>