

## Первый опыт мониторинга космической радиации в мультиспутниковом эксперименте Московского университета в рамках проекта «УниверСат-СОКРАТ»

В. В. Богомолов,<sup>1,2,а</sup> А. В. Богомолов,<sup>1,б</sup> Ю. Н. Дементьев,<sup>1</sup> В. Е. Еремеев,<sup>1</sup>  
Ю. К. Зайко,<sup>1</sup> В. В. Калегаев,<sup>1</sup> П. А. Климов,<sup>1</sup> В. И. Оседло,<sup>1</sup> М. И. Панасюк,<sup>1,2</sup>  
В. Л. Петров,<sup>1</sup> О. Ю. Перетьяко,<sup>1</sup> М. В. Подзолко,<sup>1</sup> С. И. Свертилов<sup>1,2</sup>

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына;  
<sup>2</sup> физический факультет, кафедра физики космоса.  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

Поступила в редакцию 22.08.2020, после доработки 19.10.2020, принята к публикации 19.10.2020.

Программа Московского университета «УниверСат-СОКРАТ» направлена на использование малых спутников для мониторинга космических угроз, таких как радиация в околоземном пространстве, электромагнитные транзиенты, потенциально опасные тела естественного и искусственного происхождения. Первый этап реализации программы стартовал 5 июля 2019 г. в результате успешного запуска с космодрома «Восточный» трех наноспутников типа «Кубсат». На этих спутниках установлена аппаратура для мониторинга космической радиации, а также прототипы приборов для наблюдений транзиентных явлений в атмосфере Земли. В частности, на двух спутниках установлены сцинтилляционные фосвич-детекторы, регистрирующие заряженные частицы и гамма-кванты в диапазоне энергывыделений 0.1–2 МэВ. Геометрический фактор этих приборов  $\approx 50 \text{ см}^2\cdot\text{ср}$ . Один из кубсатов также несет оптический фотометр, состоящий из четырех кремниевых фотоумножителей, чьи входные окна закрыты разными световыми фильтрами. Спутники выведены на солнечно-синхронную орбиту с высотой  $\approx 550 \text{ км}$ . Это создает благоприятные условия мониторинга космической радиации в различных областях околоземного пространства, включая зоны захваченной радиации, районы высыпаний и т. п. Такая орбита также позволяет осуществлять наблюдения вспышечных явлений как в приэкваториальной атмосфере, так и на высоких широтах. Обсуждаются первые итоги летных испытаний.

*Ключевые слова:* кубсаты, сцинтилляционный детектор, мониторинг космической радиации, электроны, гамма-кванты.

УДК: 537.591.5. PACS: 94.30.Xy.

### ВВЕДЕНИЕ: НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Естественная и «техногенная» космическая среда создает серьезные риски для осуществления космических миссий как роботизированных, так и с участием человека. Одним из основных факторов риска для осуществления космических миссий в околоземном пространстве является космическая радиация. Основной задачей проектируемой в рамках программы Московского университета «УниверСат-СОКРАТ»<sup>1</sup> группировки малых спутников является мониторинг космической радиации: осуществление измерений, которые позволят оперативно (в режиме, близком к «реальному времени») строить трехмерную картину текущего распределения потоков энергичных заряженных частиц в значительной области околоземного пространства и, как следствие, рассчитывать текущие потоки частиц и дозы радиации для большого числа используемых орбит искусственных спутников Земли (ИСЗ) [1–4].

Изучение потоков ионизирующих излучений космического пространства является одной из важнейших задач космических исследований. Данная задача актуальна с точки зрения как изучения физических закономерностей формирования

пространственно-временных вариаций таких потоков, так и определения их влияния на функционирование космических аппаратов (КА). По имеющимся оценкам, более половины отказов и сбоев в работе бортовых систем КА обусловлено неблагоприятным воздействием на материалы и элементы оборудования КА факторов окружающей космической среды, основную роль среди которых играют радиационные воздействия [5].

В рамках данного проекта основное внимание уделяется потокам энергичных заряженных частиц в околоземном пространстве, способных проникать внутрь корпуса КА и оказывать влияние на их радиоэлектронную аппаратуру. Главным образом это потоки энергичных электронов и протонов радиационных поясов Земли, захваченные, квазизахваченные и высыпющиеся; а также кратковременные интенсивные потоки энергичных частиц от мощных солнечных вспышек. Следует принимать во внимание также возможность появления на низких орбитах потоков электронов релятивистских и субрелятивистских энергий, ускоренных во время высотных электромагнитных разрядов.

Экспериментальные измерения потоков энергичных заряженных частиц в околоземном пространстве начались с запуском первых ИСЗ. В 1960–70 гг. такие измерения проводились на советских исследовательских ИСЗ серий «Электрон» и «Прогноз» и спутниках связи «Молния» и «Космос», американских спутниках серий Explorer, Injun, Telstar, IMP,

<sup>а</sup> E-mail: [bogovit@rambler.ru](mailto:bogovit@rambler.ru)

<sup>б</sup> E-mail: [aabboogg@sinp.msu.ru](mailto:aabboogg@sinp.msu.ru)

<sup>1</sup> Английская аббревиатура «UniverSat» — University Satellites. Русская аббревиатура «СОКРАТ» — Система Оповещения о Космической Радиационной, Астероидной и Техногенной опасностях.

OGO, Pegasus, ATS и др. Эти измерения позволили определить общую структуру радиационных поясов, выявить механизмы генерации и потерь частиц. На основе этих измерений в 1970–80 гг. были созданы эмпирические модели радиационных поясов Земли: американские модели AP8 и AE8 [6, 7] и модели НИИЯФ МГУ [8–10]. Они описывают пространственное и энергетическое распределение всенаправленных потоков протонов с энергиями от сотен килоэлектрон до сотен мегаэлектрон и электронов с энергиями от десятков кэВ до  $\approx 7\text{--}10$  МэВ в значительном диапазоне околоземного пространства: от высот  $\approx 150$  км до области геостационарной и высокоэллиптических орбит. В последнее время разрабатываются новые модели, такие как американская модель AP9/AE9 [11] и модели НИИЯФ [12, 13], учитывающие новые экспериментальные данные. Указанные модели используются для расчетных оценок радиационных условий полета при разработке космических аппаратов.

Однако эти модели являются статическими. В то же время реальные потоки заряженных частиц в окрестности Земли даже в спокойных и слабо-возмущенных геомагнитных условиях испытывают существенные средне- и долгосрочные вариации, в частности, очень значительные вариации потоков электронов внешнего пояса [14, 15], образовавшиеся во время мощных магнитных бурь временные квазистабильные пояса энергичных электронов и протонов в области зазора [16–18], вариации потоков частиц внутреннего пояса на малых высотах [19]. Как следствие, реальные потоки энергичных заряженных частиц на орбитах ИСЗ могут существенно отличаться от модельных значений. По этой причине необходимы новые экспериментальные измерения, которые могут дать информацию о радиационной обстановке на околоземных орбитах в текущий момент.

В настоящее время измерения потоков энергичных заряженных частиц осуществляются рядом спутников, в частности американскими ИСЗ серий POES [20] на низких околополярных орбитах и GOES [21] на геостационарной орбите, приборами НИИЯФ МГУ на российских метеоспутниках серий «Метеор-М» (низкоорбитальные) и «Электро-Л» (геостационарные) [22, 23] и рядом других ИСЗ, в том числе малыми космическими аппаратами. Но большинство этих КА осуществляют измерения потоков энергичных заряженных частиц только в ограниченной области пространства и диапазоне пичуглов (угол между векторами скорости частицы и индукции магнитного поля). Отдельно стоит отметить ИСЗ Van Allen Probes для научных исследований радиационных поясов Земли, выведенные в 2012 г. на квазигеопереходную орбиту [24]. В настоящее время Европейским космическим агентством начата разработка проекта D3S (Distributed Space weather Sensor System) группировки малых спутников для изучения потоков заряженных частиц в околоземном пространстве и полярных сияний [25].

Перечисленные факты обуславливают актуальность проекта МГУ группировки малых спутников, одной из основных задач которого является оперативный мониторинг и изучение динамики радиации в околоземном пространстве.

Первый этап реализации программы мониторинга космической радиации с помощью группировки малых спутников стартовал в 2019 г., когда с космодрома «Восточный» 5 июля 2019 г. в качестве попутной полезной нагрузки были успешно запущены КА «Сократ», «АмурСат» и «ВДНХ-80» класса «Кубсат 3U». Спутники выведены на круговую солнечно-синхронную орбиту с высотой  $\approx 550$  км и наклоном  $97.7^\circ$ . На этих спутниках установлены прототипы приборов для мониторинга космической радиации, а также для наблюдений транзиентных явлений в атмосфере Земли. В частности, на спутниках «АмурСат» и «ВДНХ-80» установлены сцинтилляционные фосвич-детекторы ДеКоР, регистрирующие заряженные частицы и гамма-кванты. Спутник «ВДНХ-80» также несет оптический фотометр, состоящий из четырех кремниевых фотоумножителей, чьи входные окна закрыты разными световыми фильтрами. Таким образом, прибор обеспечивает наблюдения атмосферы Земли в диапазонах от ультрафиолетового до красного. Околополярные орбиты спутников обеспечивают благоприятные условия мониторинга космической радиации в различных областях околоземного пространства, включая зоны захваченной радиации, районы высыпаний и т.п. Такие орбиты также позволяют осуществлять регистрацию вспышечных явлений как в приэкваториальной атмосфере, так и на высоких широтах.

## 1. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ ДЕКОР

Полезная нагрузка ДеКоР (Детектор Космической Радиации) представляет собой прибор с широким полем зрения ( $\approx \pi$  ср) и геометрическим фактором  $\approx 50$  см<sup>2</sup>·ср для измерения потоков и спектров заряженных частиц и гамма-излучения в диапазоне энергывыделений в детекторе 0.1–2 МэВ. Этот прибор может рассматриваться как прототип универсального детектора космической радиации, позволяющий регистрировать кратковременные изменения потоков электронов и гамма-квантов. Основными научными задачами являются исследование быстрых вариаций потоков электронов в зонах высыпаний и зазора между радиационными поясами, а также изучение динамики потоков частиц и гамма-излучения на низких орбитах в зависимости от геомагнитных условий. Важным фактором, позволяющим более эффективно проводить научные исследования, является установка прибора на двух спутниках, последовательно пролетающих через одну и ту же область околоземного пространства. Благодаря этому имеется принципиальная возможность разделять временные и пространственные эффекты в регистрируемых вариациях скоростей счета детекторов, что принципиально для понимания природы ускорения и высыпаний магнитосферных электронов.

Фотография прибора показана на рис. 2. Технические характеристики прибора ДеКоР приведены в таблице. Детектор прибора ДеКоР представляет собой двуслойный сцинтилляционный спектрометр, выполненный на основе сборки из пластического

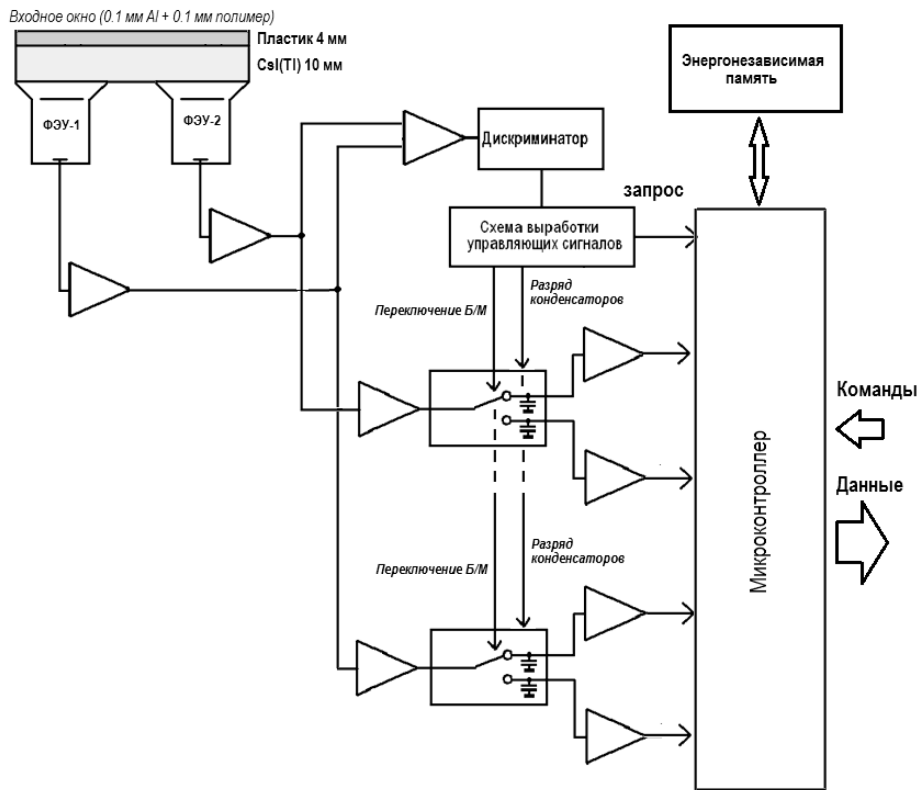


Рис. 1. Функциональная схема прибора ДеКоР



Рис. 2. Фотография прибора ДеКоР

сцинтиллятора и кристалла CsI(Tl), просматриваемых двумя ФЭУ. Структура детекторного узла и функциональная схема прибора приведены на рис. 1. Раздельная оцифровка начальной и конечной части импульса («быстрая компонента» и «медленная компонента») с каждого ФЭУ позволяет по форме импульса определить сцинтиллятор, в котором произошло взаимодействие, и таким образом проводить раздельное измерение потоков электронов и гамма-излучения.

Для решения научных задач в приборе ДеКоР формируются как мониторинговые данные (скорости счета частиц измеряются и фиксируются 1 раз

Таблица. Технические характеристики прибора ДеКоР

Регистрируемые типы частиц	Гамма, электроны
Диапазон энерговывделений	0.1–2 МэВ
Эффективная площадь	18 см <sup>2</sup>
Геометрический фактор	50 см <sup>2</sup> ·ср
Динамический диапазон:	
мониторинг общего потока	0–1000 см <sup>-2</sup>
спектрально-временной анализ	0–25 см <sup>-2</sup>
Временное разрешение	20 мкс
Габаритные размеры	102 × 90 × 36 мм
Масса	400 г
Напряжение питания	7.5 В
Потребление детектора	0.7 Вт
Потребление цифрового узла	0.1 Вт

в несколько секунд), так и подробные данные обо всех взаимодействиях в детекторе с временным разрешением 20 мкс, накапливаемые в памяти прибора по команде, определяющей интересующий исследователя момент времени. Основной способ проведения научного эксперимента состоит в регулярном сборе и передаче на Землю мониторинговых данных, а также активации время от времени режима подробной записи на предварительно рассчитанных участках траектории спутника, проходящих через зоны возможных вариаций потоков захваченных и квази-захваченных частиц. После просмотра данных типа «Мониторинг» исследователь выделяет моменты времени, в которые интересующие его вариации потока действительно происходили. Для этих моментов запрашиваются подробные данные для передачи на Землю.

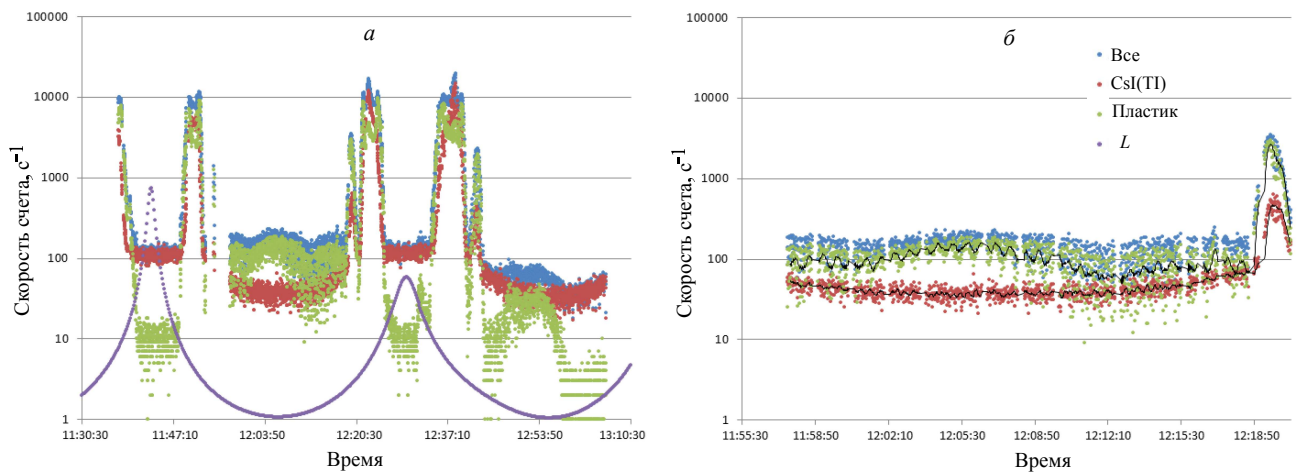


Рис. 3. *а* — Скорости счета мониторинговых каналов на 1 витке 14.08.2019 (Все — все события, CsI — события в CsI(Tl), Пластик — события в пластическом сцинтилляторе). *б* — Скорости счета в тех же каналах вблизи экватора в более подробном масштабе; черные гладкие линии показывают значения, полученные методом скользящего среднего

Летные испытания прибора ДеКоР на спутниках «АмурСат» и «ВДНХ-80» подтвердили работоспособность и характеристики аппаратуры как в режиме мониторинговых измерений, так и в режиме накопления подробных данных. В настоящее время приборы функционируют в режиме регулярных включений на время  $\approx 1$  витка с интервалом в несколько дней, во время которых сбрасываются накопленные данные. Для передачи мониторинговых данных требуется 1–3 сеанса связи.

## 2. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Пример результатов измерений с помощью прибора ДеКоР, установленного на спутнике «АмурСат», приведен на рис. 3, *а*. Прибор был включен 14.08.2019, когда спутник находился над Калугой и затем двигался в направлении северной полярной области. На рисунке изображен временной ход скоростей счета в мониторинговых каналах, записанных с временным разрешением 1 с. В этих каналах осуществляется регистрация темпа счета событий отдельно в кристалле CsI(Tl) — преимущественно гамма-квантов с энергиями более 100 кэВ, и пластмассовом сцинтилляторе — главным образом электронов с энергиями более 300 кэВ, и суммарного счета в обоих сцинтилляторах. Также приведена соответствующая временная зависимость величины  $L$  — так называемого параметра Мак-Илвайна, характеризующего номер дрейфовой оболочки. Хорошо видны максимумы в моменты нахождения спутника во внешнем радиационном поясе Земли ( $L \approx 3.5–7$ ), обусловленные регистрацией как непосредственно электронов, так и порождаемых ими гамма-квантов за счет тормозного излучения при взаимодействии электронов в веществе спутника и самого прибора.

Особо следует обратить внимание на плавное возрастание скорости счета электронов во время пролета геомагнитного экватора ( $L \approx 1.0$ ) со стороны противоположной Южно-Атлантической аномалии. При этом в отличие от пересечения внешнего радиационного пояса скорость счета фоновых гамма-квантов оставалась неизменной, что говорит

о том, что соответствующие потоки приэкваториальных электронов характеризуются относительно мягкими энергетическими спектрами, а сами их величины невелики, чтобы дать значимое количество «тормозных» гамма-квантов. На рис. 3, *б* показаны данные прибора ДеКоР на экваторе в более подробном масштабе. На том же рисунке приведены линии скользящего среднего для скоростей счета в CsI(Tl) и в пластмассовом сцинтилляторе. Линия для событий в последнем демонстрирует модуляцию с периодом  $\approx 40$  с, связанную с вращением спутника. Для событий в CsI(Tl) модуляция практически не наблюдается. Это указывает на анизотропный характер распределения потоков приэкваториальных электронов.

Как было отмечено выше, важным преимуществом мультиспутниковых экспериментов является возможность одновременных измерений в разных точках околоземного пространства с одной стороны и измерений в одних и тех же областях при последовательном прохождении аппаратов через них — с другой. Такие измерения иллюстрирует рис. 4, на котором приведены показания двух приборов ДеКоР, установленных на спутниках «АмурСат» и «ВДНХ-80», зарегистрированные 18 марта 2020 года. Разница положений спутников составляла примерно половину орбиты; таким образом, одновременно один космический аппарат проводил измерения в северной полярной области, а другой — в южной.

Приборы на обоих аппаратах были включены над Калугой, когда спутники двигались в направлении северной полярной области. В момент включения прибора ДеКоР на спутнике «ВДНХ-80» кубсат «АмурСат» находился в южном полушарии, соответственно включение прибора ДеКоР на нем было осуществлено через  $\approx 45$  минут. При этом спутник «АмурСат» продолжал движение по сходной траектории с аппаратом «ВДНХ-80».

На рис. 4, *а* изображен временной ход скорости счета электронов с энергией  $> 300$  кэВ вдоль витка орбиты спутника «ВДНХ-80», записанный в мониторинговом режиме с временным разрешением 5 с. Как видно из рисунка, приведенный временной ход



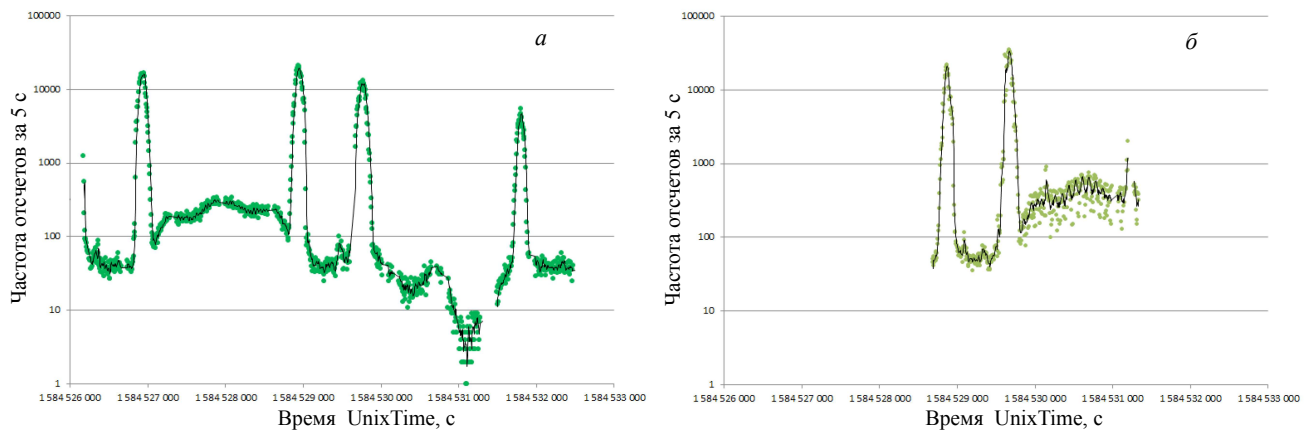


Рис. 4. Временной ход скорости счета электронов с энергией > 300 кэВ, записанный 18.03.2020 10:06:40–12:03:20 в мониторингном режиме работы прибора ДеКоР на спутниках «ВДНХ-80» (а), «АмурСат» (б)

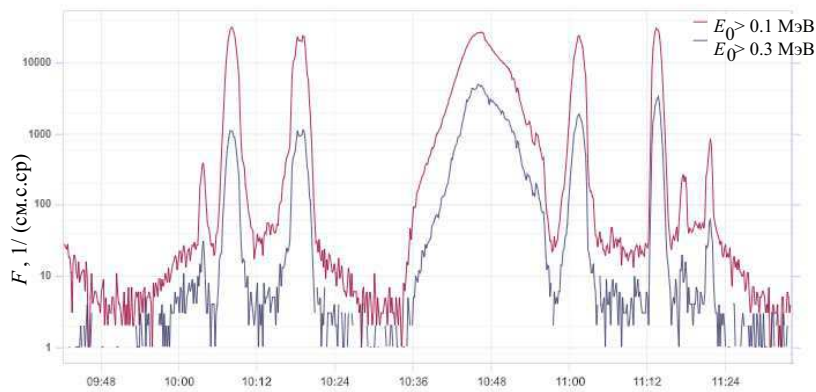


Рис. 5. Поток электронов с энергиями > 100 кэВ (верхняя кривая) и > 300 кэВ (нижняя), измеренные прибором МСГИ на спутнике «Метеор-М» № 2 18.04.2020 г.

практически повторяет зависимость, изображенную на рис. 3, а. Хорошо видны максимумы в моменты нахождения спутника во внешнем радиационном поясе Земли, а также некоторые небольшие возрастания в полярной области. Также явно видны значимые возрастания скорости счета вблизи геомагнитного экватора.

На рис. 4, б приведены показания аналогичного канала прибора ДеКоР, установленного на спутнике «АмурСат». Обращает на себя внимание повторяемость особенностей, видимых при прохождении одной и той же полярной области двумя спутниками с интервалом  $\approx 45$  мин. Во время пролета геомагнитного экватора также видно плавное возрастание скорости счета электронов. Линия скользящего среднего показывает модуляцию с периодом  $\approx 40$  с, связанную с вращением спутника. Как было отмечено выше, наличие подобной модуляции свидетельствует о неізотропности потока электронов в приэкваториальных областях.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Опыт совместного включения приборов одного типа на разных космических аппаратах показал принципиальную возможность осуществлять однотипные последовательные измерения в одних и тех же областях околоземного пространства на относительно короткой временной базе, что дает уникальную

возможность разделять временные и пространственные эффекты в регистрируемых вариациях скоростей счета. Примером подобных измерений являются данные о распределении потоков электронов субрелятивистских энергий во внешнем радиационном поясе, полученных на сходных орбитах в близкие интервалы времени, показало подобие основных характерных особенностей: максимумы скорости счета, соответствующие прохождению внешнего пояса; узкие максимумы, наблюдаемые симметрично вблизи внутренней границы пояса, соответствующие зонам высыпаний.

Интересно также сравнить показания приборов ДеКоР с данными других детекторов электронов, в частности, прибора МСГИ, установленного на спутнике «Метеор-М» № 2. На рис. 5 представлены данные измерений потоков электронов с энергиями > 100 кэВ и > 300 кэВ на этом космическом аппарате 18 марта 2020 г. Можно видеть, что показания приборов ДеКоР/«ВДНХ-80» и ДеКоР/«АмурСат» находятся в согласии с измерениями прибора МСГИ на КА «Метеор-М» № 2. В частности, все приборы демонстрируют одинаковое изменение темпа счета электронов при выходе из полярной шапки в область радиационного пояса (около трех порядков). Времена прохождения через полярную шапку и через радиационный пояс по данным этих приборов также

одинаковы  $\approx 300$  и  $200$  с соответственно, что свидетельствует о корректной идентификации спутниками «ВДНХ-80» и «АмурСат» размеров и положения радиационного пояса.

Отдельного внимания заслуживает регистрация значимых скоростей счета электронов субрелятивистских энергий вблизи геомагнитного экватора. Потоки подобных электронов относительно невелики по сравнению с наблюдаемыми в зонах захваченной радиации, в том числе во внешнем радиационном поясе. Поэтому для их значимой регистрации необходимы приборы с достаточно большими геометрическими факторами  $\Gamma$ . Для аппаратуры ДеКоР  $\Gamma \approx 50 \text{ см}^2$ , что более чем на порядок превышает типичные значения  $\Gamma$  детекторов электронов на основе полупроводниковых телескопов, которые обычно используются для измерений потоков и спектров электронов относительно высоких энергий. Это позволило не только регистрировать слабые потоки, но и измерять их временные вариации. В результате, как было отмечено выше, были получены указания на анизотропный характер потоков электронов вблизи геомагнитного экватора, что может свидетельствовать о том, что они характеризуются достаточно узким пич-угловым распределением. Последнее указывает на то, что они, скорее всего, являются квазизахваченными. Хотя электроны субрелятивистских энергий неоднократно регистрировались вблизи геомагнитного экватора в ряде космических экспериментов, их природа до сих пор остается до конца не выясненной, поскольку стабильные потоки квазизахваченных частиц на дрейфовых оболочках, характеризующихся малыми значениями параметра  $L$ , в теории существовать не должны. Тем не менее, относительно недавние измерения в эксперименте РЭЛЕК на спутнике «Вернов» показали, что относительно стабильные потоки субрелятивистских электронов на  $L < 1.2$  могут существовать в течение нескольких месяцев [26]. Поэтому дальнейшие исследования таких электронов безусловно представляют большой интерес.

Таким образом, первые результаты мультиспутниковых измерений на космических аппаратах типа «Кубсат» подтверждают пригодность малогабаритной низкопотребляющей аппаратуры типа ДеКоР для обеспечения мониторинга космической радиации, регистрации быстрых изменений потоков заряженных частиц и гамма-квантов.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Миннауки России (уникальный идентификатор № RFMEFI60419X0237).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панасюк М. И., Подзолко М. В., Ковтюх А. С. и др. // Космич. исслед. 2015. **53**, № 6. С. 461. (Panasyuk M. I., Podzolko M. V., Kovtyukh A. S. et al. // *Cosmic research*. 2015. **53**. P. 423.)
2. Панасюк М. И., Подзолко М. В., Ковтюх А. С. и др. // Космич. исслед. 2017. **55**, № 2. С. 85. (Panasyuk M. I., Podzolko M. V., Kovtyukh A. S. et al. // *Cosmic research*. 2017. **55**. P. 79.)
3. Садовничий В. А., Панасюк М. И., Липунов В. М. и др. // Космич. исслед. 2019. **57**, № 1. С. 1. (Sadovnichii V. A., Panasyuk M. I., Lipunov V. M. et al. // *Cosmic research*. 2018. **56**. P. 488.)
4. Panasyuk M. I., Podzolko M. V., Mammadzada T. G. et al. // *J. Space Weather Space Climate*. 2020. (In press.)
5. Новиков Л. С., Панасюк М. И. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физ радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2002. № 4. С. 3.
6. Sawyer D. M., Vette J. I. AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum. NSSDC/WDC-A-R&S 76-06, 1979.
7. Vette J. I. The AE-8 trapped electron environment // NSSDC/WDC-A-R&S 1-24, 1991.
8. Панасюк М. И., Сосновец Э. Н. и др. Естественные радиационные пояса Земли / В кн. «Модель космоса». М.: Изд. МГУ. 1983. **3**. С. 66.
9. Панасюк М. И., Сосновец Э. Н. Интенсивности электронов и протонов в зависимости от  $L$  и  $B$  / В кн. «Модель космоса». М.: Изд. МГУ. 1983. **3**. С. 421.
10. Гецелев И. В., Гусев А. А., Дарчиева Л. А. и др. Модель пространственно-энергетического распределения потоков захваченных частиц (протонов и электронов) в радиационных поясах Земли. М.: Изд. МГУ, 1991.
11. Ginet G. P., O'Brien T. P., Huston S. L. et al. // *Space Sci. Rev.* 2013. **179**, N 1–4. P. 579.
12. Гецелев И. В., Сосновец Э. Н., Ковтюх А. С. и др. // Космич. исслед. 2005. **43**, № 4. С. 243. (Getselev I. V., Sosnovets E. N., Kovtyukh A. S. et al. // *Cosmic Research*. 2005. **43**. P. 229.)
13. Кузнецов Н. В., Николаева Н. И. // Космич. исслед. 2012. **50**, № 1. С. 15 (Kuznetsov N. V., Nikolaeva N. I. // *Cosmic Research*. 2012. **50**. P. 13.)
14. Тверская Л. В., Балашов С. В., Веденькин Н. Н. и др. // Геомагнетизм и Аэронаука. 2012. **52**, № 6. С. 779. (Tverskaya L. V., Balashov S. V., Veden'kin N. N. // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012. **52**. P. 740.)
15. Panasyuk M. I., Kalegaev V. V., Myagkova I. N. et al. // *Cosmic Research*. 2017. **55**, N 6. P. 464.)
16. Горчаков Е. В., Афанасьев В. Г., Афанасьев К. Г. и др. // Изв. вузов МВ и ССО СССР. Физика. 1987. № 10. С. 69.
17. Mullen E. G., Gussenhoven M. S., Ray K., Violet M. A. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1991. **38**. P. 1713.
18. Логачёв Ю. И., Лазутин Л. Л. // Космич. исслед. 2012. **50**, № 2. С. 122. (Logachev Yu. I., Lazutin L. L. // *Cosmic Research*. 2012. **50**. P. 116.)
19. Кузнецов Н. В., Николаева Н. И., Панасюк М. И. // Космич. исслед. 2010. **48**, № 1. С. 81. (Kuznetsov N. V., Nikolaeva N. I., Panasyuk M. I. // *Cosmic Research*. 2010. **48**. P. 80.)
20. Evans D. S., Greer M. S. Polar Orbiting Environmental Satellite Space Environment Monitor – 2: instrument descriptions and archive data documentation. NOAA Technical Memorandum OAR SEC-93. NOAA, Boulder, CO, USA. 2000.
21. Onsager T. G., Grubb R., Kunches J. et al. // *Proceedings of SPIE*. 1996. **2812**. P. 281.
22. Власова Н. А., Гинзбург Е. А., Калегаев В. В. и др. // Космич. исслед. 2013. **51**, № 5. С. 355. (Vlasova N. A., Ginzburg E. A., Kalegaev V. V. et al. // *Cosmic Research*. 2013. **51**. P. 319.)
23. Баринаева В. О., Богомолов А. В., Калегаев В. В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2011. № 6. С. 121. (Barinova V. O., Bogomolov A. V., Kalegaev V. V. et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2011. **66**, N 6. P. 616.)

24. Fox N., Burch J.L. *The Van Allen Probes Mission*. Springer, 2014.
25. Kraft S., Lupi A., Luntama J.-P. ESA's Distributed Space Weather Sensor System (D3S) utilizing hosted payloads for operational space weather monitoring // Proc. 67th International Astronautical Congress, Guadalajara, Mexico, 26–30 September 2016. P. IAC-16,D1,7,1,x35329.
26. Петров В.Л., Богомолов А.В., Богомолов В.В. и др. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2020. **60**. № 2. С. 153. (Petrov V.L., Bogomolov A.V., Bogomolov V.V. et al. // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020. **60**. P. 151.)

### A First Experience of Space Radiation Monitoring in the Multi-Satellite Experiment of Moscow University in the Framework of the Universat-SOCRAT Project

V. V. Bogomolov<sup>1,2,a</sup>, A. V. Bogomolov<sup>1,b</sup>, Yu. N. Dement'ev<sup>1</sup>, V. E. Eremeev<sup>1</sup>, Yu. K. Zaiko<sup>1</sup>, V. V. Kalegaev<sup>1</sup>, P. A. Klimov<sup>1</sup>, V. I. Osedlo<sup>1</sup>, M. I. Panasyuk<sup>1,2</sup>, V. L. Petrov<sup>1</sup>, O. Yu. Peretjat'ko<sup>1</sup>, M. V. Podzolkov<sup>1</sup>, S. I. Svertilov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Skobel'syn Institute of Nuclear Physics; <sup>2</sup>Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.  
E-mail: <sup>a</sup>bogovit@rambler.ru, <sup>b</sup>aabboogg@sinp.msu.ru.

The Moscow University Universat-SOCRAT program is aimed at using small satellites to monitor space threats, such as radiation in near-earth space, electromagnetic transients, and potentially dangerous bodies of natural and artificial origins. The first stage of the program implementation began on July 5, 2019 as a result of the successful launch of three Cubesat-type nanosatellites from the Vostochny cosmodrome. These satellites are equipped with instruments for space radiation monitoring, as well as prototypes of devices for observing transient phenomena in the Earth's atmosphere. In particular, two satellites are equipped with scintillation phosphor detectors that detect charged particles and gamma quanta in the energy release range of 0.1–2 MeV. The geometric factor of these instruments is  $\approx 50 \text{ cm}^2 \text{ sr}$ . One of the Cubesats also carries an optical photometer, consisting of four silicon photomultipliers, which entrance windows are covered with different light filters. The satellites were launched into solar-synchronous orbits with an altitude of  $\approx 550 \text{ km}$ . This makes favorable conditions for space radiation monitoring in various areas of near-Earth space, including zones of trapped radiation, areas of precipitation, etc. Such an orbit also allows observations of flare phenomena both in the equatorial atmosphere and at high latitudes. The first results of flight tests are discussed.

**Keywords:** Cubesats, scintillation detector, space radiation, monitoring, electrons, gamma-quanta.

PACS: 94.30.Xy.

Received 22 August 2020.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2020. **75**, No. 6. Pp. 676–683.

#### Сведения об авторах

1. Богомолов Виталий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, преподаватель; тел: (495) 939-51-60, e-mail: bogovit@rambler.ru.
2. Богомолов Андрей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел: (495) 939-51-60, e-mail: aabboogg@sinp.msu.ru.
3. Деметьев Юрий Николаевич — вед. программист; тел: (495) 939-18-18, e-mail: dementiev@gmail.com.
4. Еремеев Валерий Евгеньевич — вед. программист; тел: (495) 939-18-18, e-mail: eremeev@dec1.sinp.msu.ru.
5. Зайко Юрий Константинович — ведущий конструктор; тел: (495) 939-18-18, e-mail: zaikoiurii@yandex.ru.
6. Калегаев Владимир Владимирович — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; e-mail: klg@dec1.sinp.msu.ru.
7. Климов Павел Александрович — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел: (495) 939-23-69, e-mail: pavel.klimov@gmail.com.
8. Оседло Владислав Ильич — канд. физ.-мат. наук, зам. директора; тел: (495) 939-10-85, e-mail: osedlo@mail.ru.
9. Панасюк Михаил Игоревич — доктор физ.-мат. наук, профессор, директор НИИЯФ МГУ, зав. кафедрой; тел: (495) 939-18-18, e-mail: panasyuk@sinp.msu.ru.
10. Петров Василий Львович — мл. науч. сотрудник, конструктор; тел: (495) 939-50-50, e-mail: vas.i.nas@gmail.com.
11. Перетяtko Олег Юрьевич — главный специалист, ведущий электроник; тел: (495) 939-18-18, e-mail: pouoleg@mail.ru.
12. Подзolkov Михаил Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел: (495) 939-52-33, e-mail: spacerad@mail.ru.
13. Свртилов Сергей Игоревич — доктор физ.-мат. наук, доцент, вед. науч. сотрудник; тел: (495) 939-18-18, e-mail: sis@coronas.ru.