

Научно-образовательный космический эксперимент на спутниках «СириусСат-1,-2»

В. В. Богомолов,^{1,2,а} А. В. Богомолов,^{1,б} Ю. Н. Дементьев,¹ В. Е. Еремеев,¹ Р. Н. Жарких,³
А. Ф. Июдин,¹ И. А. Максимов,¹ В. И. Оседло,¹ М. И. Прохоров,^{1,2} С. И. Свертилов^{1,2}

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,

¹ *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобелевича;*

² *физический факультет, кафедра физики космоса.*

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

³ *ООО «Спутникс». Россия, 121205, Москва, Технопарк.*

«Сколково», Большой бульвар, 42, стр. 1, офис 3.305.

Поступила в редакцию 30.07.2020, после доработки 13.10.2020, принята к публикации 21.10.2020.

Представлены результаты научно-образовательного эксперимента, осуществленного в России на космических аппаратах «СириусСат-1,-2», выполненных в формате «Кубсат 1U+». Запуск двух аппаратов «СириусСат-1,-2» был произведен 15 августа 2018 г. космонавтами с МКС. Полезной нагрузкой «СириусСат» служит детектор на основе нескольких оптически соединенных сцинтилляторов, осуществляющий регистрацию заряженных частиц и γ -квантов в диапазоне энерговывделений 0.3–3 МэВ. Режим измерений предусматривает как ежесекундный мониторинг, так и подробный режим с фиксацией энергии каждой частицы или кванта, а также соответствующего момента времени с микросекундной точностью. С каждого спутника ежедневно поступает ~ 100 кб научных данных, размещенных в открытом доступе на сервере космической погоды НИИЯФ МГУ. В полете проводится исследование вариаций потоков высыпающихся и квазизахваченных электронов внешнего радиационного пояса Земли и на границе Южно-Атлантической аномалии, изучение динамики потоков частиц и гамма-квантов в зависимости от геомагнитных условий. Дополнительные возможности дает анализ прохождения областей захваченных и высыпающихся частиц двумя близко летящими спутниками.

Ключевые слова: кубсаты, детекторы, космическая радиация, высыпания магнитосферных электронов.

УДК: 537.591.5. PACS: 94.30.Xy.

ВВЕДЕНИЕ: НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для решения научных и прикладных задач физики космоса все большую роль играют эксперименты на наноспутниках [1]. Одни из них — спутники «СириусСат-1,-2», выполненные в формате «Кубсат 1U+». Работа с ними была начата в июле 2017 года в ходе проектной смены в образовательном лагере Сириус (г. Сочи) с участием талантливых школьников. Впоследствии было принято решение изготовить и запустить в космос два одинаковых наноспутника по заказу образовательного центра «Сириус». К маю 2018 г. были изготовлены и настроены три спутника (два летных и запасной). Запуск был произведен космонавтами с МКС 15 августа 2018 г. Техническую поддержку проекта в части разработки и изготовления платформы спутника и наземного комплекса обеспечила частная российская космическая компания «Спутникс», а в части разработки полезной нагрузки, постановки научных задач, подготовки данных и обеспечения доступа к ним — НИИЯФ МГУ. В качестве основного научного направления для «СириусСат» было выбрано исследование вариаций потоков электронов с энергиями до нескольких мегаэлектронвольт. В НИИЯФ МГУ по этой проблеме имеется значительный опыт, включающий эксперименты на первых ИСЗ [2], станции «Мир» [3, 4], обсерваториях серии «КОРОНАС» [5, 6]. Начиная с запуска в 2005 г. микроспутника «Татьяна» [7]. Московский университет реализует собственную

космическую программу, включающую исследование электронов РПЗ. В частности, на космических аппаратах (КА) «Вернов» (2014 г.) [8, 9] и «Ломоносов» (2016 г.) [10] такие исследования проводились с помощью сцинтилляционных детекторов электронов, рентгеновского и гамма-излучения, принцип работы которых аналогичен приборам на спутниках «СириусСат».

Полезной нагрузкой (ПН) спутников «СириусСат» служит детектор, осуществляющий регистрацию заряженных частиц и гамма-квантов в диапазоне энерговывделений 0.3–3 МэВ. Он был разработан, изготовлен и настроен под руководством специалистов НИИЯФ МГУ, при участии специалистов ООО «Спутникс» и одаренных школьников. С помощью детектора предполагалось проводить измерения, как медленно, так и быстро меняющихся потоков электронов и гамма-квантов на орбите с наклоном в 51° и с высотой, меняющейся от ~ 430 км в начале эксперимента (август 2018 г.) до ~ 370 км в январе 2020 г. Данные возможно использовать как в научных, так и в образовательных целях. В ходе эксперимента были проведены летные испытания бортовых систем, осуществлено замедление вращения спутников, в течение всего времени полета обеспечивался регулярный сброс данных на Землю.

Основной научной задачей эксперимента является исследование высыпаний электронов внешнего и внутреннего радиационных поясов Земли, в том числе проведение тонкого временного анализа потоков высыпающихся и квазизахваченных электронов релятивистских и субрелятивистских энергий.

^а E-mail: bogovit@rambler.ru

^б E-mail: aabboog@sinp.msu.ru

Высыпающиеся электроны регулярно обнаруживаются на дрейфовых оболочках, соответствующих областям захваченной радиации ($L \sim 1.6-1.9, 3.0-5.0$), но на высотах существенно меньше тех, на которых находится основное «население» радиационных поясов. Кроме того, высыпания часто наблюдают вблизи границ радиационных поясов, в частности в области, близкой к внутренней границе внешнего радиационного пояса, в так называемом «зазоре», при этом наблюдаются как короткоживущие (наблюдаемые в течение одного витка космического аппарата) нерегулярные возрастания потока электронов, так и более стабильные во времени потоки частиц [11, 12].

Большой научный и практический интерес также представляют мониторинговые наблюдения динамики радиационных условий на малых высотах, в том числе на орбитах, имеющих наклонение, близкое к орбите МКС, поскольку они важны для обеспечения безопасности космических полетов, в частности для выработки методов предотвращения сбоя электронной аппаратуры на борту космических аппаратов при резких возрастаниях потоков релятивистских электронов радиационных поясов Земли (РПЗ) на фазе восстановления геомагнитных бурь. Ранее измерения потоков энергичных электронов на орбитах, аналогичных орбите космических аппаратов (КА) «СириусСат», проводились, в частности, в эксперименте с аппаратурой ГРИФ на орбитальном комплексе «Мир-Спектр» [3, 13]. Нужно отметить, что в этом эксперименте для анализа использовались показания не только детекторов частиц, но и гамма-спектрометра, регистрирующего вторичное гамма-излучение, обусловленное взаимодействиями космических лучей и высыпающихся магнитосферных электронов в веществе КА [14]. Полезная нагрузка КА «СириусСат» также регистрирует гамма-кванты, но, поскольку масса наноспутника очень мала, потоки вторичных гамма-квантов существенно меньше наблюдавшихся на станции «Мир».

Еще одной задачей экспериментов на спутниках «СириусСат» является исследование субрелятивистских электронов на $L < 2$, значимые потоки которых наблюдаются на низких широтах вне Южно-Атлантической аномалии (ЮАА), в том числе на $L < 1.2$, то есть фактически вблизи экватора [13, 15].

Исследования электронов в околоземном пространстве на наноспутниках класса CubeSat («Кубсат») широко практикуются за рубежом. Следует отметить, что установленные на «СириусСат» детекторы по чувствительности не уступают большинству приборов на зарубежных спутниках. Мониторинг с секундным разрешением, реализованный в эксперименте «СириусСат», является типичным и достаточным для исследования вариаций, связанных с явлениями космической погоды. Для изучения тонкой пространственно-временной структуры областей повышенных потоков электронов в современных зарубежных экспериментах, таких, как AeroCube 6 [16] и FireBird-II [17], реализовано временное разрешение в сотни и десятки миллисекунд, а для лучшего спектрального разрешения

применяются полупроводниковые детекторы. В эксперименте «СириусСат» такое же и даже лучшее временное разрешение достигается за счет дополнительного режима записи времени взаимодействия каждой частицы с точностью 20 мкс. Такая точность избыточна, если потоки частиц невелики, но при изучении РПЗ чувствительность детекторов обеспечивает временное разрешение в доли секунды. Фиксация энерговыделения каждой частицы позволяет получать на этапе обработки также подробные спектры. Вместе с тем отсутствие заданной ориентации аппарата существенно усложняет анализ информации и существенно уменьшает возможности эксперимента. Поэтому большинство новых проектов как зарубежных, так и отечественных предлагают кубсаты формата 3U и более, с ориентацией спутника по трем осям и с большей информативностью. Также следует отметить, что большинство проектов по исследованию магнитосферных электронов используют кубсаты на полярных орбитах. На спутниках «СириусСат» измерения на широтах более 51° , в том числе в полярных шапках и на внешней границе внешнего РПЗ, не проводятся.

Научные задачи, связанные с измерением потоков частиц на низких орбитах в зависимости от геомагнитной обстановки, могут наиболее эффективно решаться путем сравнительного анализа с данными экспериментов на других КА, работающих как на аналогичных, так и на других орбитах. Возможные конфигурации могут включать такие варианты, как:

- 1) последовательный пролет одной и той же области близко расположенными спутниками, что позволит разделить пространственные и временные эффекты;
- 2) одновременные измерения на разных L-оболочках, что позволит наблюдать смещение максимумов радиационных поясов во время геомагнитных возмущений;
- 3) одновременные измерения на одной высоте приборами, расположенными на двух спутниках, смещенных по долготе друг относительно друга, что позволит оценить влияние фактора локального времени на динамику потоков частиц.

Какая-то часть этих задач может решаться группировкой из нескольких одновременно запущенных космических аппаратов, имеющих на борту детекторы, аналогичные ПН спутников «СириусСат», другая часть — путем совместного анализа данных с одного или нескольких наноспутников, находящихся на низкой орбите, с данными более массивного КА, имеющего более высокую орбиту и оснащенного комплексом аппаратуры, обеспечивающим подробные измерения потоков частиц, электромагнитного поля и других параметров магнитосферной плазмы [18]. Следует отметить, что данные многих современных научно-исследовательских миссий являются открытыми и доступны для проведения совместного анализа. Например, такой подход позволил наблюдать высыпания электронов в полярной области спутником FireBird-II [17] формата «Кубсат 1.5U» одновременно с ОНЧ-волнами, наблюдавшимися комплексом аппаратуры на спутнике «Ван Аллен», которые могли быть причиной этих высыпаний [19].

Важной особенностью наблюдений на спутниках «СириусСат» является то, что впервые в практике отечественных космических экспериментов проводятся измерения с помощью идентичной аппаратуры на КА, находящихся практически на сходных орбитах, причем временной интервал между последовательными пролетами одной и той же области может не превышать десятков минут. Это дает хорошие возможности для разделения временных и пространственных эффектов при регистрации вариаций темпа счета частиц и квантов.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Аппараты были выведены в космос с борта МКС 15 августа 2018 года в 16:52 UTC («СириусСат-1») и 16:56 UTC («СириусСат-2») во время планового выхода космонавтов в открытый космос. Оба КА были отделены от МКС в направлении против вектора движения станции со скоростью около 1 м/с. «СириусСат-2» имел немного большую начальную скорость, в связи с чем большую часть всего полета «СириусСат-1» опережал «СириусСат-2» при наблюдениях с Земли. На момент отделения оба КА имели орбиту МКС (средняя высота 404.6 км, наклонение 51.66° , эксцентриситет близок к 1), которая затем деградировала под воздействием внешних факторов. После двух лет полета орбита «СириусСат-1» имеет высоту от 333.8 км в перигее до 338.9 км в апогее, «СириусСат-2» — от 334 км до 339.2 км. Период обращения сократился с 93 мин до 91 мин, однако это несущественно с точки зрения приема данных с обоих КА. При сохранении текущего уровня солнечной активности к концу 2020 года высота орбиты «СириусСат» экспоненциально уменьшится с текущих 330 км до 200 км, после чего они сгорят в атмосфере в течение нескольких дней.

Первые сигналы с аппаратов были приняты в течение следующих суток после отделения от МКС, после чего проведены летные испытания служебных систем. С 28 августа по 3 сентября 2018 г. была проведена первая серия включений полезной нагрузки и приема данных на Земле. В штатном режиме пролеты каждого КА над ЦУП, расположенном в Сколково, представляли собой серию из 3–5 десятиминутных периодов видимости каждые 1.5 ч. Затем КА не пролетал над ЦУП в течение примерно 16 ч. В первые месяцы после отделения и затем повторно, через полтора года полета, пролеты обоих КА над Сколково происходили с пересечением по времени видимости, и работа с ними была возможна по очереди.

Для повышения стабильности радиосвязи и репрезентативности измерений был проведен ряд сеансов по замедлению собственного вращения с использованием электромагнитной системы демпфирования угловой скорости КА. Ручное выведение КА допускает высокую начальную угловую скорость, в частности, она составляла 110 и 117 град/с для соответственно «СириусСат-1» и «СириусСат-2». В течение первого месяца полета за серию из 3 включений алгоритма, использующего встроенный магнитометр и печатные электромагнитные катушки без сердечника, встроенные в платы солнечных панелей КА, угловая скорость вращения обоих аппаратов была снижена

до 10 град/с при погрешности не более 2 град/с. Вращение контролировалось встроенным независимым датчиком угловой скорости на КА, дополнительно использовалась оценка периодичности вращения диаграммы направленности антенны КА, наблюдаемая на спектрограмме во время сеансов сброса данных. В течение дальнейшего полета с периодичностью раз в несколько месяцев проводилась подстройка скорости вращения КА в область 10 град/с.

Конструктивно КА представляет собой наноспутник кубической формы с четырьмя направляющими рельсами по граням с габаритами 100×100 мм высотой 113 мм, между рельсами по всем боковым сторонам установлены солнечные панели со встроенными электромагнитными катушками, со стороны Z предусмотрена большая рукоятка для ручного запуска. Все электронные приборы, аккумуляторная батарея и полезная нагрузка размещены во внутреннем объеме КА под защитой боковых панелей из стеклотекстолита толщиной 1.5 мм. Каркас корпуса алюминиевый. В транспортировочном положении КА имеет сложенные пружинные антенны, которые затем самостоятельно раскрываются, после чего КА переходит в штатный режим и имеет рабочие габариты $236 \times 365 \times 131$ мм. Вес КА составляет 1.45 кг.

Система электропитания обеспечивает получение энергии от Солнца с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), запасание ее в аккумуляторной батарее и выдачу потребителям — другим системам КА и ПН. Применяемая Li-Ion аккумуляторная батарея обеспечивает накопление до 40 Вт·ч энергии, которой хватает для долговременных включений ПН. В целом оба КА после двух лет работы имеют положительный энергобаланс, система питания не ограничивает использование ПН.

Система УКВ-радиосвязи работает в радиолобительском частотном диапазоне и представлена цифровым приемопередатчиком с программно-настраиваемой частотой и параметрами сигнала, а также антенной системой с автоматическим раскрытием. Применен полудуплексный режим связи по протоколу AX.25 с временным разделением приема и передачи, между собой КА имеют частотное разделение: «СириусСат-1» работает на частоте 435.570 МГц, «СириусСат-2» — на частоте 435.670 МГц. Кроме того, аппараты имеют контроль радиопозывных. Скорость передачи данных — 4800 бит/с. Используемые протоколы связи являются открытыми и позволяют принимать сигналы с обоих КА радиолюбителями со всего мира, для облегчения этой задачи на сайте компании «Спутник» также были размещены инструкции и примеры по приему сигналов с аппаратов данной серии.

В КА используется распределенная система управления, которая обеспечивает повышенную живучесть аппарата. Все системы КА объединены в локальную шину CAN, где, благодаря использованию расширенного протокола UniCAN, каждое устройство функционирует автономно, имеет свой адрес и способно обращаться к любому другому устройству на шине. УКВ-приемопередатчик выполняет роль сетевого маршрутизатора и подключает наземный сегмент в качестве еще одного «виртуального»

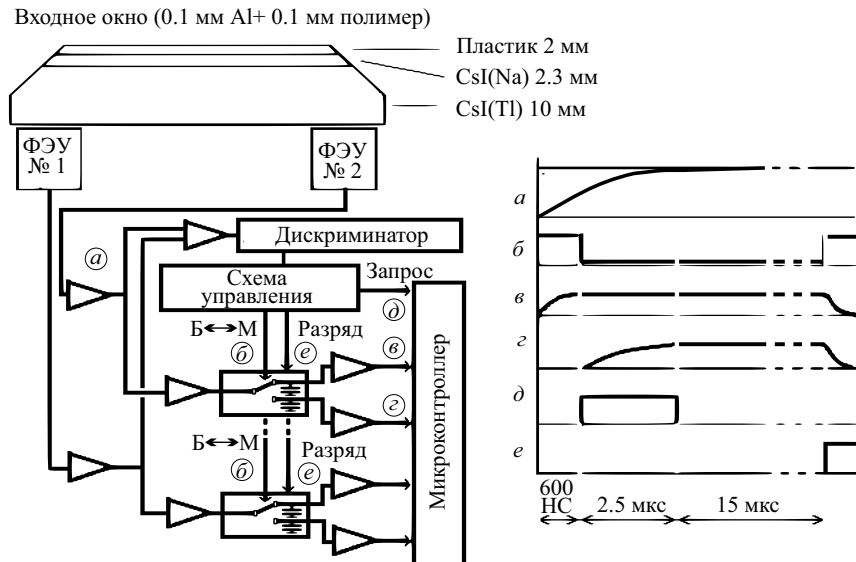


Рис. 1. Конфигурация детектора и блок-схема электроники полезной нагрузки спутников «СириусСат», эпюры напряжений: *a* — сигналы с ФЭУ, *b* — управление ключом, *в* — сигнал быстрой компоненты, *г* — сигнал медленной компоненты, *д* — запрос на микроконтроллер, *е* — разрядка ключей

устройства к шине. Таким образом, оператор ЦУП может непосредственно общаться с любым устройством КА, в том числе с ПН, минуя центральный бортовой процессор. Такая конфигурация позволяет проводить обновление и восстановление программного обеспечения любого устройства на шине, что оказалось востребовано в рамках эксперимента. На КА имеется бортовой вычислитель, который способен выполнять полетные задания, отправленные оператором ЦУП, что активно применяется при работе с КА. По сути, на данный момент достигнута почти полная автоматизация процесса получения данных с использованием следующего алгоритма работы:

1. Оператор ПН формирует полетное задание с указанием времени включения датчиков и параметров сброса данных на ЦУП, используя автоматизированное ПО; ЦУП автоматически сопровождает оба КА при их пролетах, с настройкой частоты и поворотом антенны.
2. Полученные от КА данные непосредственно сохраняются в облачном хранилище в сети Интернет.
3. С ЦУП на КА автоматически отправляется сформированное следующее полетное задание.
4. Программные средства НИИЯФ загружают данные из облачного хранилища для дальнейшей обработки.

Таким образом, для работы с КА практически не требуется рутинная работа по ручному контролю и управлению, устраняется участие человека в получении данных, увеличивается объем и периодичность принимаемых данных.

В состав полезной нагрузки каждого из КА «СириусСат» входит сцинтилляционный детектор, два фотозлектронных умножителя (ФЭУ), плата высоковольтного питания ФЭУ, плата аналоговой и цифровой электроники.

Детектор представляет собой сборку из трех различных типов сцинтилляторов: пластикового сцинтиллятора на основе полистирола с наполнением

добавкой из РОРОР-а, кристалла CsI(Na) и кристалла CsI(Tl), просматриваемых одними и теми же ФЭУ, — так называемый фосвич. Расположение кристаллов и фотоприемников приведено на рис. 1. Сборка сцинтилляторов закрыта светоотражающей пленкой с внешней стороны, кроме окон для ФЭУ. Оптический контакт между сцинтилляторами, а также между CsI(Tl) и ФЭУ, обеспечивается склейкой оптическим клеем типа СКТН.

Питание двух ФЭУ типа Hamamatsu R2248 осуществляется через один делитель с помощью высоковольтного преобразователя Hamamatsu C4900-01. Для обеспечения механической и электрической прочности, а также обеспечения световой изоляции детектора внутренняя часть корпуса, а также зона высоковольтного преобразователя залита компаундом на основе СКТН с добавлением черного красителя.

Физико-технические параметры детектора приведены в таблице.

Таблица. Физико-технические параметры детектора КА «СириусСат»

Регистрируемые типы частиц	Гамма-кванты, электроны
Диапазон регистрируемых энергий, МэВ	0.3–3
Эффективная площадь, см ²	~ 4
Динамический диапазон:	
режим мониторинга, см ⁻² с ⁻¹	0–10 ⁴
режим спектрально-временного анализа, см ⁻² с ⁻¹	0–10 ²
Временное разрешение, мкс	20
Габаритные размеры, мм	95 × 89 × 22
Масса, г	240
Напряжение питания, В	7.5
Энергопотребление ПН, Вт	0.65
Энергопотребление цифрового узла, Вт	0.1

В состав ПН входит также и плата аналоговой и цифровой электроники, на которой расположены также вторичные источники низковольтного питания. Блок-схема аналоговой части и временные диаграммы, поясняющие принцип ее работы, приведены на рис. 1. Аналоговые преобразователи сигнала обеспечивают прием и усиление входного сигнала с ФЭУ, формирование импульса запроса на обработку зарегистрированного события, а также формирование четырех сигналов, подлежащих оцифровке и анализу с помощью микроконтроллера. Эти сигналы представляют собой импульсы напряжения с амплитудой, пропорциональной количеству света, собранного за первые ~ 600 нс (быстрая компонента) и за последующие ~ 2 мкс (медленная компонента) на каждом ФЭУ.

Цифровая электроника ПН выполнена на основе микроконтроллера STM32L432KCU6, к которому для сбора и хранения данных подключена микросхема внешней энергонезависимой памяти W25Q128FV объемом 16 Мб. Микроконтроллер по сигналу прерывания от детекторной электроники последовательно производит оцифровку четырех сигналов на своих входах. Цифровые значения амплитуд сигналов записываются в память, одновременно фиксируется время события по внутреннему таймеру микроконтроллера. Из этих значений формируются блоки данных, которые посылаются на передатчик по шине CAN при получении соответствующего запроса.

Плата аналоговой и цифровой электроники подключается к бортовой шине космического аппарата, от которого получает питание и производит обмен данными по шине CAN. Полезная нагрузка принимает команды от бортовых систем, а также собирает и отправляет два типа массивов, содержащих данные:

- телеметрическая информация («Маяк»), отправляемая регулярно каждые 10 с (интервал может регулироваться командами);
- основные массивы научных данных, передаваемые порциями по запросу. Накапливаются и передаются на Землю два типа массивов данных — «Мониторинг», содержащий скорости счета в нескольких каналах (по умолчанию 3 канала), и «Массив», содержащий запись точного времени и амплитудных характеристик для каждого зарегистрированного взаимодействия в детекторе.

В массивах данных помещается время в стандарте UNIXtime. Значение текущего времени принимается от бортовых систем космического аппарата по шине CAN. В промежутках между моментами синхронизации используется собственный таймер микроконтроллера. Для записи моментов взаимодействия частиц используется таймер, имеющий период ~ 10 мкс. Научные данные типа «Мониторинг» и «Массив» передаются блоками длиной 238 байт по запросу, поступающему по шине CAN в виде команды, содержащей в качестве параметров тип данных, их адрес в памяти прибора и требуемое число запрашиваемых блоков.

Калибровка детектора производилась в НИИЯФ МГУ с использованием источников гамма-излучения Cs-137, Na-22, Ba-133 и источника электронов Sr-90.

В ходе калибровки производился штатный набор данных типа «массив» при нахождении источника в поле зрения прибора. В результате были получены зависимости, позволяющие переводить номера каналов АЦП в энергетические единицы.

В экспериментах на спутниках «СириусСат» имеется возможность по командам с Земли задавать пороги мониторинговых каналов, а также соотношение энерговыделений в различных кристаллах, определяющие отбор событий для более детальной обработки. По результатам анализа показаний детектора в начале ноября 2018 г. была проведена перепрошивка (обновление программы) микроконтроллеров полезной нагрузки обоих аппаратов, позволившая более гибко настраивать пороги мониторинговых каналов и увеличить объем передаваемых данных. С каждого спутника ежедневно поступает ~ 50 – 100 кб научных данных. С ноября 2018 г. по июнь 2020 г. получено ~ 45 Мб с «СириусСат-1» и ~ 40 Мб с «СириусСат-2». Данные размещаются в открытом доступе на сервере космической погоды НИИЯФ МГУ по адресу <http://swx.sinp.msu.ru> [20], где есть утилита по получению и визуализации как показаний детекторов, так и рассчитываемых сотрудниками НИИЯФ МГУ геомагнитных координат и других параметров, необходимых для научного анализа.

По результатам первых месяцев работы в ноябре 2018 г. было проведено обновление программы микроконтроллера полезной нагрузки на обоих аппаратах, в результате которой для передачи на Землю в мониторинговом режиме были установлены следующие параметры: **1** — суммарный счет во всех сцинтилляторах; **2** — счет событий в CsI с энерговыделением более ~ 1 МэВ, в основном гамма-кванты; **3** — счет событий в пластике, т. е. электронов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Начиная с августа 2018 г. и по настоящее время оба спутника «СириусСат-1,-2» ведут измерения, притом с ноября 2018 г. настройка детекторов не изменялась, что дает возможность сравнения их показаний за длительное время и поиска различий, связанных с вариациями геомагнитной обстановки и изменением параметров орбиты. На рис. 2 приведены графики мониторинговых измерений, проведенных в течение четырех часов 24.12.2018 г., 22.06.2019 г., 30.12.2019 г. и 11.01.2020 г. на одной и той же траектории (началу измерений соответствует положение в точке с координатами широта -20.9° , долгота $+42.7^\circ$, затем спутник двигался по нисходящей траектории, концу измерений соответствует положение в точке с координатами широта $+43.7^\circ$, долгота -167.0°). На панелях *a*, *b*, *в*, *г* рис. 2 изображены временные зависимости скорости счета гамма-квантов с энергиями > 1 МэВ (параметр **2**). Наблюдается широтный ход, а также повышение потоков во время прохождения Южно-Атлантической аномалии (ЮАА), это имело место 24.12.2018 г. в $\sim 17:10$ UT. Графики показывают отсутствие существенных изменений скоростей счета этого параметра в одних и тех же областях в течение более года, что отражает стабильность характеристик детектора. Отметим, что солнечная активность

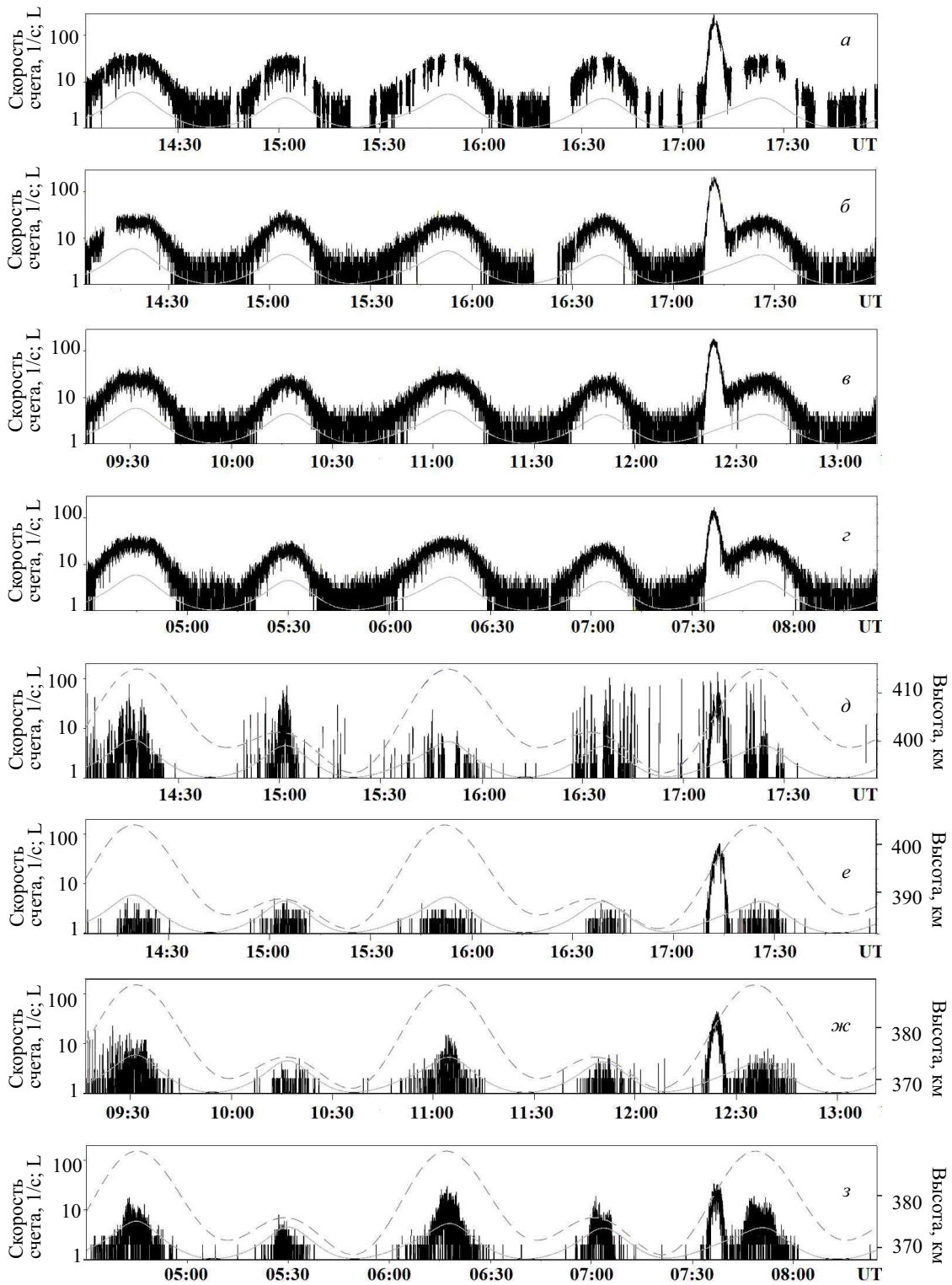


Рис. 2. Скорости счета гамма-квантов — параметр **2** (панели *а, б, в, г*) и электронов — параметр **3** (панели *д, е, ж, з*), измеренные детекторами «СириусСат-1» на одинаковых витках 24.12.2018 г. (*а, д*), 22.06.2019 г. (*б, е*), 30.12.2019 г. (*в, ж*) и 11.01.2020 г. (*г, з*). Сплошная линия — параметр МакИллвайна L . Пунктирная линия — высота орбиты «СириусСат-1»

в это время была низкая, геомагнитная обстановка — спокойная, а наклонение орбиты спутников «СириусСат» 51° позволяет проводить измерения при значениях параметра МакИллвайна L не более 6. Величины L показаны на всех панелях рис. 2.

На панелях *д, е, ж, з* рис. 2 изображены аналогичные зависимости параметра **3** — скорости счета детектора в пластическом сцинтилляторе, вызванные

в основном электронами с энергиями более 0.2 МэВ. Значимые скорости счета этого параметра наблюдаются прежде всего в районе внешнего РПЗ, а также в ЮАА, а на экваторе скорости счета близки к нулю. Вместе с тем, в отличие от параметра **2**, для скорости счета электронов наблюдаются значительные расхождения в результатах измерений в различные дни, притом только на больших L . Их нельзя объяснить

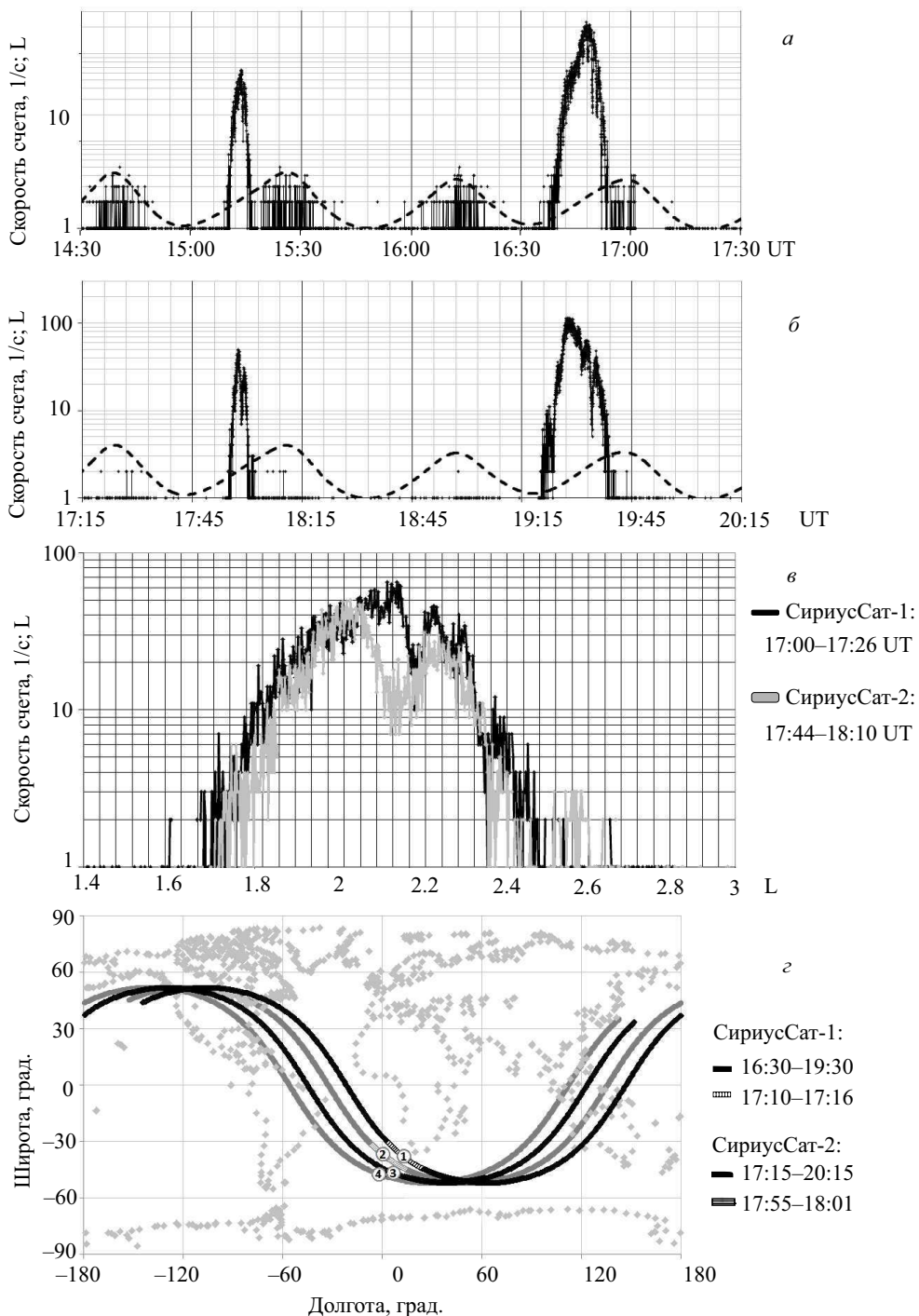


Рис. 3. Скорости счета электронов (параметр **З**), регистрируемые в зависимости от времени детекторами «СирiuсSat-1» (а) и «СирiuсSat-2» (б) 22.06.2019 г., а также в зависимости от L (в) для прохождения областей захваченной радиации. (г) орбиты «СирiuсSat-1,-2» для интервалов времени, показанных на остальных панелях этого рисунка. Пунктир: L . Цифры: 1 — положение «СирiuсSat-1» во время пика в 17:13:30 UT, 2 — положение «СирiuсSat-2» во время пика в 17:57:30. 3 и 4 — положение «СирiuсSat-1» и «СирiuсSat-2» соответственно во время измерений, представленных на рис. 4

высотным ходом, поскольку монотонного снижения или повышения счета не наблюдалось, а различия видны, в том числе для измерений 30.12.2019 г. и 11.01.2020 г., т. е. фактически на тех же высотах. Высота спутника отмечена на рис. 3 пунктирной линией, с 24.12.2018 г. по 11.01.2020 г. она уменьшилась всего на ~ 30 км. Различие в скоростях счета параметра **З** можно объяснить нестабильностью ориентации космического аппарата.

Одна из приоритетных задач для спутников «СирiuсSat» — исследования быстрых вариаций потоков электронов на внутренней границе внешнего радиационного пояса и на границе ЮАА. Дополнительные возможности для разделения пространственно-временных зависимостей предоставляет анализ последовательного прохождения двумя близко летящими спутниками одной и той же области магнитосферы Земли. Интересны три ситуации: оба спутника

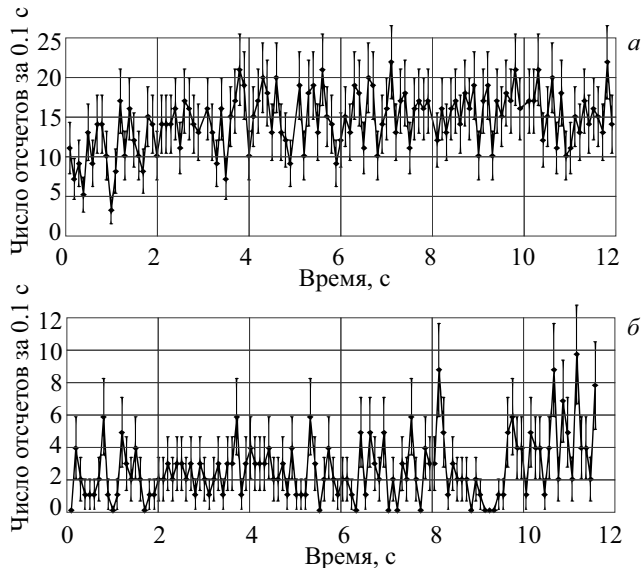


Рис. 4. Скорость счета электронов при пролете границы ЮАА спутниками «СириусСат-1,-2» на одних и тех же $L = 2.535-2.565$ 22.06.2019 г. *a* — «СириусСат-1», начало измерений соответствует 18:49:37, долгота $+6.75^\circ$, широта -46.65° . *б* — «СириусСат-2», начало измерений соответствует 19:34:50, долгота -0.40° , широта -47.85°

находятся в одной точке и подтверждают показания друг друга; 2-й спутник отстает на несколько минут и наблюдает те же области, но с временной задержкой; 2-й спутник запаздывает на полвитка и проводит наблюдения в то же время, на тех же L , но в другом полушарии.

На рис. 3 показаны результаты наблюдений 22.06.2019 г. двумя спутниками «СириусСат», запаздывающими друг относительно друга на ~ 45 мин. Орбиты спутников показаны на рис. 3, *г*. На выбранных витках спутники проходили область зазора между внешним РПЗ и ЮАА, эти моменты отмечены на рис. 3, *г* светлыми полосами, зависимость параметра **З** для обоих спутников от L показана на рис. 3, *в*. То, что при измерениях, проведенных на двух спутниках с разностью в 45 мин, пик на $L = 1.8-2.4$ близок по амплитуде и фактически сохранил форму, говорит о стабильности потоков электронов в данной области. На панели 3, *в* видно, что скорости счета электронов в «зазоре» промодулированы вращением аппаратов, что свидетельствует об анизотропном характере пич-углового распределения потоков электронов. В свою очередь, пич-угловая анизотропия свидетельствует в пользу того, что в «зазоре» наблюдаются именно квазизахваченные электроны.

Во время пролета границы ЮАА и внутренней кромки внешнего радиационного пояса наблюдалось присутствие быстрой переменности потока электронов с характерными временами в диапазоне десятков миллисекунд на $L \sim 2.5$. Пример такой переменности на границе ЮАА представлен на рис. 4. Показаны измерения 22.06.2019 г. двумя спутниками «СириусСат» с разницей во времени ~ 45 мин на одних и тех же $L = 2.55 \pm 0.015$, положения спутников отмечены на рис. 3. При сравнении графиков значимых повторяющихся структур не наблюдается, поэтому рассматриваемые быстрые вариации, в отличие

от плавного возрастания скорости счета в зазоре, обусловлены не пространственными, а именно временными эффектами, имеющими случайный характер. Различие в средних скоростях счета приборов на спутниках «СириусСат-1» и «СириусСат-2» обусловлено неодинаковыми значениями коэффициентов усиления ФЭУ.

3. ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ

На всех этапах реализации проект «СириусСат» имел не только научно-техническую, но и образовательную направленность. Уже на этапе разработки и тестирования аппаратуры спутника в работе принимали непосредственное участие учащиеся старших классов из разных городов РФ, отобранные по конкурсу школьных проектов для выполнения конструкторских и научно-исследовательских работ под руководством ученых и инженеров в течение трехнедельной смены в лагере «Сириус» (г. Сочи). Конкретно в июле 2017 г группа из 9 человек выполняла проект «Наноспутник», результатом которого стал первый экземпляр спутника «СириусСат».

Четверо школьников работали над полезной нагрузкой: изготавливали многослойный сцинтилляционный детектор и механические детали (Дмитрий Артюшев, г. Тула), собирали и настраивали электронные платы (Николай Перевалов, г. Москва), отлаживали программы для входящего в состав прибора микроконтроллера (Андрей Лукин, г. Новосибирск, Иван Заичкин, г. Москва). Другая группа школьников (5 человек) проводила отработку взаимодействия бортовых систем использованного для создания спутника опытного комплекта кубсат-конструктора «Орбикрафт-про», предоставленного фирмой «Спутникс», а также тестировала алгоритмы стабилизации космического аппарата с помощью магнитных катушек (Всеволод Ефремов, г. Москва, Константин Нелаев, г. Березовский — математическое моделирование; Александр Бредихин, г. Екатеринбург — программирование; Александр Воронцов, г. Екатеринбург — разработка конструкции; Илья Оразов, г. Орел — проведение испытаний). В конце смены все разработанные и проверенные системы были интегрированы в готовый спутник, с которым были проведены вибрационные и термовакуумные испытания. Во время завершающего этапа работ с ПН весной 2018 г. был организован недельный мастер-класс для учащихся 8–11 классов, с которыми были проведены занятия по работе бортовых систем и полезной нагрузки наноспутников и по анализу научных данных о космической погоде. Уже после отправки спутников на космодром состоялась очередная проектная летняя смена в лагере «Сириус», в ходе которой одна из групп занималась проработкой миссии «СириусСат» с точки зрения оптимизации космического эксперимента.

Свободный доступ к данным спутников «СириусСат» организован на сервере космической погоды НИИЯФ МГУ <http://swx.sinp.msu.ru>, что позволяет проводить на базе «СириусСат» учебные занятия по работе с космической информацией и изучению физики космоса, аналогичные [21]. Практическая работа школьников старших классов и студентов, интересующихся физикой космоса, по анализу данных

с детекторов способствует получению практических навыков работы с космической аппаратурой, повышению интереса и приобретению знаний в области физики космоса, а также способствует привлечению талантливой молодежи к работам по освоению космоса.

Осенью 2019 г во время форума «Проектория» в г. Ярославле группа школьников из разных городов России успешно составила циклограммы, которые были заложены в компьютер ЦУП, в результате были получены свежие данные и проведен их предварительный анализ. В весеннем семестре 2020 года спутникам «СириусСат» была посвящена часть спецкурса «Планирование и проведение космофизического эксперимента на орбите» для студентов физического факультета МГУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, можно отметить плюсы и минусы использования сверхмалых спутников формата «Кубсат 1U» в научных исследованиях и в образовательных целях. Очевидно, главными плюсами являются относительно низкая стоимость и быстрая реализация космического эксперимента. Например, от начала работы над проектом до запуска в космос в случае спутников «СириусСат» прошло примерно полтора года. К минусам можно отнести очень маленькую пропускную способность канала связи (за сеанс связи в диапазоне ~ 435 МГц удается передать не более 100 кБ) и ограничения по мощности аппаратуры (около 1 Вт), а также невозможность использования заданной ориентации космического аппарата. Эти проблемы могут быть решены при переходе к спутникам большего размера. Ряд компаний разрабатывает платформы в стандарте «Кубсат 3U», использующие маховики для трехосной ориентации и радиопередатчики X-диапазона, значительно повышающие информативность. Однако в этом случае значительно возрастает стоимость спутника. Научная ценность эксперимента значительно повышается при одновременной работе нескольких кубсатов как на сходных орбитах, так и на различных высотах, а также вместе со спутниками больших размеров, как планируется в проекте «Универсат-СОКРАТ [16].

Опыт проведенных измерений потоков захваченных, квазизахваченных и высыпающихся электронов на низкобюджетных КА «СириусСат-1» и «СириусСат-2» показал большую эффективность подобных экспериментов. За полтора года работы с обоих спутников было получено более 85 Мбайт данных, что сопоставимо с информативностью детекторов заряженных частиц, устанавливаемых на традиционных метеорологических и геофизических спутниках типа «Метеор» или «Электро». При этом затраты ресурсов (как финансовых, так и материальных) на проведение экспериментов на КА типа «кубсат» на порядки величин меньше, что свидетельствует о высокой эффективности космофизических исследований на КА такого класса. Использование группировок наноспутников имеет существенное преимущество по сравнению с «большими» КА в плане изучения динамических процессов, поскольку они позволяют проводить одновременные

измерения в различных областях околоземного пространства и надежно разделять временные и пространственные эффекты. Относительная дешевизна запуска подобных аппаратов позволит в перспективе наращивать группировку и тем самым реализовать более детальные измерения вариаций потоков частиц и квантов.

Что касается образовательных возможностей, то перечисленные минусы не так существенны и даже в некоторой степени становятся плюсами: студенты и школьники учатся работать с более простой, а значит, более понятной аппаратурой, при этом они должны научиться учитывать ограниченные возможности наноспутника. Для получения научного результата приходится аккуратно готовить циклограммы управления спутником и выбирать режимы работы аппаратуры, а при анализе данных необходимо принимать во внимание такие особенности, как наличие сбоев и пробелов в данных, влияние вращения спутника и т.п.

Как показал опыт работы с КА «СириусСат-1,-2», школьники, имеющие хорошую физико-математическую подготовку, не только способны понять объяснения инженеров и научных сотрудников, но и сами включаются в работу по проекту, приобретая навыки исследователя. Некоторые участники работы со спутниками «СириусСат» уже успели поступить в ведущие вузы страны: физический факультет МГУ, МФТИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, и др. Студенты МГУ используют данные «СириусСат» при подготовке курсовых и дипломных работ.

Работа спутников «СириусСат-1,-2» продолжается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Millan R. M., von Steiger R., Ariel M. et al. // *Advances in Space Research*. 2019. **64**. P. 1466.
2. Логачев Ю. И. // *Природа*. 2017. № 12. С. 12.
3. Богомолов А. В., Логачев Ю. И., Кудрявцев М. И. и др. // *Изв. РАН, сер. физ.* 1997. **61**, № 6. С. 1129.
4. Братолобова-Цулукидзе Л. С., Грачев Е. А., Григорян О. Р., Нечаев О. Ю. // *Космические исследования*. 2001. **39**, № 6. С. 602.
5. Мягкова И. Н., Богомолов А. В., Шугай Ю. С. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2010. № 3. С. 77. (Myagkova I. N., Bogomolov A. V., Shugai Yu. S. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2010. **65**, N 3. P. 234.)
6. Баринаева В. О., Богомолов А. В., Калегав В. В. и др. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2011. № 6. С. 121. (Barinova V. O., Bogomolov A. V., Kalgayev V. V. et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2011. **66**, N 6. P. 616.)
7. Садовничий В. А., Панасюк М. И., Яшин И. В. и др. // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. 2011. **45**, № 1. С. 5.
8. Панасюк М. И., Свертилов С. И., Богомолов В. В. и др. // *Космические исследования*. 2016. **54**, № 4. С. 277.
9. Панасюк М. И., Свертилов С. И., Богомолов В. В. и др. // *Космические исследования*. 2016. **54**, № 5. С. 369.
10. Богомолов А. В., Мягкова И. Н., Калегав В. В. и др. // *Космические исследования*. 2017. **55**, № 6. С. 459.
11. Мягкова И. Н., Свертилов С. И., Ковтюх А. С. и др. // *Космические исследования*. 2017. **55**, № 1. С. 75.

12. Ковтюх А. С., Мягкова И. Н., Богомолов В. В. и др. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2016. **56**, № 6. С. 700.
13. Богомолов А. В., Денисов Ю. И., Колесов Г. Я. и др. // *Космические исследования*. 2005. **43**, № 5. С. 323.
14. Богомолов А. В., Богомолов В. В., Денисов Ю. И. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1999. **63**, № 8. С. 1665.
15. Петров В. Л., Богомолов А. В., Богомолов В. В. и др. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020. **60**, № 2. С. 153.
16. Shumko M., Johnson A. T., Sample J. G. et al. // *J. of Geophys. Res.: Space Physics*. 2020. **125**. e2019JA027651.
17. Crew A. B., Spence H. E., Blake J. B. et al. // *J. of Geophys. Res.: Space Physics*. 2016. **121**. P. 5272.
18. Панасюк М. И., Подзолко М. В., Калегаев В. В. и др. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2018. № 6. С. 104. (Panasyuk M. I., Podzolko M. V., Kalegaev V. V. et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **73**, N 6. P. 687.)
19. Breneman A. W., Crew A., Sample J. et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2017. **44**. P. 11265.
20. Myagkova I. N., Kalegaev V. V., Panasyuk M. I. et al. // *Proceedings IAU Symposium No. 335*. 2017. P. 232.
21. Панасюк М. И., Радченко В. В., Богомолов А. В. и др. *Космический практикум / Под ред. А. С. Ковтюха*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Университетская книга, 2006.

A Scientific and Educational Space Experiment on the SiriusSat-1,2 Satellites

V. V. Bogomolov^{1,2,a}, A. V. Bogomolov^{1,b}, Yu. N. Dement'ev¹, V. E. Ereemeev¹, R. N. Zharkikh³, A. F. Iuydin¹, I. A. Maksimov¹, V. I. Osedlo¹, M. I. Prokhorov¹, S. I. Svertilov^{1,2}

¹Skobel'syn Institute of Nuclear Physics; ²Department of Space Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

³Sputnix LTD. Skolkovo. Moscow 121205, Russia.

E-mail: ^abogovit@rambler.ru, ^baabboogg@sinp.msu.ru.

The results of a scientific and educational experiment on the SiriusSat-1 and SiriusSat-2 spacecraft carried out in Russia in the format Cubesat 1U+ are presented. The launch of two SiriusSat-1,2 spacecraft was carried out on August 15, 2018 by astronauts from the ISS. The payload of the SiriusSat satellites is a detector based on several optically connected scintillators; it registers charged particles and γ -quanta in the energy release range of 0.3–3 MeV. The measurement mode provides both second-by-second monitoring and a detailed mode fixing the energy of each particle or quantum, as well as the corresponding time instant with a microsecond accuracy. Each satellite transmits ~ 100 kB of scientific data daily, which are available on the space weather server of the Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University. During the flight, the variations in the precipitating and quasi-trapped electron fluxes of the outer Earth radiation belt and at the border of the South Atlantic Anomaly, and the dynamics of the particle fluxes and gamma rays depending on geomagnetic conditions have been studied. Additional possibilities are provided by the analysis of the passage of the areas of captured or precipitating particles by two closely flying satellites.

Keywords: Cubesats, detectors, space radiation, precipitation of magnetospheric electrons.

PACS: 94.30.Xy.

Received 30 July 2020.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2020. **75**, No. 6. Pp. 665–675.

Сведения об авторах

1. Богомолов Виталий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; e-mail: bogovit@rambler.ru.
2. Богомолов Андрей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: aabboogg@sinp.msu.ru.
3. Дементьев Юрий Николаевич — вед. программист; тел.: (495) 939-51-60, e-mail: dementiev@gmail.com.
4. Еремеев Валерий Евгеньевич — вед. программист; тел.: (495) 939-58-62, e-mail: eremeev@dec1.sinp.msu.ru.
5. Жарких Роман Николаевич — вед. инженер; тел.: (499) 322-43-15, e-mail: roman.zharkikh@sputnix.ru.
6. Иудин Анатолий Федорович — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-42-90, e-mail: aiyudin@srd.sinp.msu.ru.
7. Максимов Иван Алексеевич — программист 1-й категории; тел.: (495) 939-51-60, e-mail: maximov1234@yandex.ru.
8. Оседло Владислав Ильич — канд. физ.-мат. наук, зам. директора; тел.: (495) 939-10-85, e-mail: osedlo@mail.ru.
9. Прохоров Михаил Иванович — студент; тел.: (495) 939-51-60, e-mail: mishapro12345@icloud.com.
10. Свртилов Сергей Игоревич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-51-60, e-mail: sis@coronas.ru.