

УДК 523.98; 520.6.05

НАБЛЮДЕНИЯ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА СПУТНИКАХ ФОРМАТА КУБСАТ ГРУППИРОВКИ МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

© 2025 г. А. В. Богомолов^{1, *}, В. В. Богомолов^{1, 2}, А. Ф. Июдин¹,
И. Н. Мягкова¹, С. И. Свертилов^{1, 2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия

*e-mail: aabboogg@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 05.03.2024 г.

После доработки 03.05.2024 г.

Принята к публикации 15.05.2024 г.

В работе показаны возможности использования наноспутников формата кубсат для регистрации жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ) солнечных вспышек. Приводятся результаты измерений ЖРИ нескольких вспышек в диапазоне энергий >30 кэВ приборами ДеКоР-1 и ДеКоР-3, установленными на спутнике *Авион*, а также таблица вспышек, наблюдавшихся в ЖРИ на кубсатах группировки МГУ с сентября 2023 г. по февраль 2024 г.

DOI: 10.31857/S0023420625010022, EDN: HEWOWK

1. ВВЕДЕНИЕ

Вспышки на Солнце являются одним из наиболее экстремальных проявлений солнечной активности. Во время вспышки за короткое время выделяется огромное количество энергии во всем спектре излучения — от радиоволн до рентгеновского гамма-излучения. Солнечные вспышки оказывают существенное влияние на космическую погоду в первую очередь за счет ионизации верхних слоев земной атмосферы на освещенной стороне Земли. Также они могут сопровождаться потоками заряженных частиц (протонов, электронов, ускоренных непосредственно во вспышке и доускоренных в межпланетном пространстве, в результате чего наблюдается ухудшение радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве (ОКП). Другим явлением, связанным со вспышечными процессами на Солнце, выступают корональные выбросы массы (КВМ), которые в случае достижения ими орбиты Земли становятся причиной геомагнитных бурь.

Как известно, нетепловое излучение солнечных вспышек, жесткое рентгеновское излучение

(ЖРИ) и гамма-излучение, — результат взаимодействия заряженных частиц с солнечной атмосферой (например, [1] и ссылки там). Общепринятая классификация солнечных вспышек основана на энергии тепловой плазмы, которая является источником мягкого рентгеновского излучения (МРИ) солнечных вспышек. Класс вспышки принято определять по интенсивности МРИ излучения с длиной волны $1-8 \text{ \AA}$ (соответствует $1.5-12.5 \text{ кэВ}$) и $0.5-4 \text{ \AA}$ (соответствует $3-25 \text{ кэВ}$), измеренного на искусственном спутнике Земли (ИСЗ) серии *GOES*. Временная эволюция МРИ, ЖРИ и γ -излучения Солнца, а также их энергетический спектр в широком интервале энергий дают нам информацию о частицах, ускоренных непосредственно во вспышке на Солнце.

Современные экспериментальные исследования показывают, что в процессе солнечных вспышек происходит ускорение электронов до высоких энергий, приводящее к нагреву солнечной плазмы. Стандартная модель солнечной вспышки описана, например, в работе [2]. На предвспышечной фазе корональная плазма в области вспышки медленно нагревается,

происходит нарастание магнитной энергии. Затем, в импульсной фазе в результате магнитного пересоединения в вершине петли происходит ускорение электронов. Ускоренные электроны распространяются по магнитной петле к ее основаниям, где, в условиях толстой мишени, они производят ЖРИ посредством тормозного излучения и нагревают плазму до высоких температур, наблюдаемых в мягком рентгеновском излучении. Горячая плазма расширяется по петле в корону, этот процесс называется “испарением”. В фазе затухания корональная плазма возвращается в исходное состояние.

Данный сценарий может объяснить такие экспериментальные факты, как положение источников МРИ и ЖРИ, превышение энергии ускоренных электронов над тепловой энергией, содержащейся в источнике мягкого рентгеновского излучения, более жесткие спектры в основаниях петли по сравнению с верхними источниками.

Описанная выше модель не единственная. Например, в работе [3] была предложена модель коллапсирующей магнитной ловушки, для которой увеличение температуры приводит к росту на 6–8 порядков количества квазитепловых электронов, способных преодолеть “барьер кулоновских потерь”. В свою очередь это предполагает необходимость преднагрева фоновой плазмы до ≥ 10 МК, за которое может отвечать бетатронный механизм.

Физические свойства области ускорения частиц и процессы, происходящие в ней, требуют дальнейшего изучения. Открытым, в частности, остается вопрос о причине наличия или отсутствия во вспышках эффекта Ньюперта [4] (корреляции потока мягкого рентгеновского излучения с кумулятивным потоком жесткого рентгеновского излучения) как результата нагрева плазмы ускоренными электронами.

Также данные по регистрации жесткого нейтрального излучения солнечных вспышек с энергией выше 100 кэВ представляют не только научный, но и практический интерес, поскольку жесткое рентгеновское излучение может быть использовано в качестве алерта появления потоков солнечных космических лучей (СКЛ). Авторы исследования [5] включили в число необходимых и достаточных наблюдательных условий для предсказания в реальном времени протонных вспышек генерацию жесткого рентгеновского излучения с энергией $E > 100$ кэВ длительностью более 5 мин.

Кроме того, в контексте задач космической погоды, интерес представляет регистрация на одном и том же космическом аппарате не только жесткого рентгеновского излучения солнечной вспышки, но и потоков СКЛ, образовавшихся после этой вспышки. Результаты измерений потоков СКЛ, выполненные в экспериментах на кубсатах НИИЯФ МГУ, представлены в публикациях [6, 7].

2. ИССЛЕДОВАНИЯ НА СПУТНИКАХ ФОРМАТА КУБСАТ

Целью настоящей работы является анализ возможности использовать для измерения жесткого рентгеновского излучения не “классические” спутники, а наноспутники формата кубсат. Этот формат был разработан как определенный стандарт малых искусственных спутников Земли, имеющих габаритные размеры в виде куба со стороной 10 см. Использование стандартов сделало значительно дешевле как разработку самих аппаратов (за счет установки полезной нагрузки на уже готовые платформы), так и их выведение на околоземную орбиту, чаще всего попутным запуском. Поэтому создание своего наноспутника стало реальным для многих организаций, в том числе для научно-исследовательских институтов и университетов. Статистика использования кубсатов отражена на сайте <https://www.nanosats.eu/>. Отметим, что для современных задач спутники размером $10 \times 10 \times 10$ см³ (этот размер обозначают 1U) часто оказываются малы и организации используют аппараты вдвое (2U), втрое (3U), вшестеро (6U) большие по размерам.

Помимо прикладных, коммерческих, образовательных проектов и т.п. все большее число кубсатов запускается для научных исследований различных космических явлений, в том числе связанных с космической погодой и солнечной активностью. Так, в статье [8] приводятся результаты работы трех поколений солнечных спектрометров мягкого рентгеновского излучения MinXSS, установленных на кубсатах. Во всех трех миссиях основным научным инструментом является кремниевый дрейфовый детектор с фильтром из бериллиевой фольги в диапазоне 0.5–20 кэВ. В работе [8] показаны спектры, по интенсивности линий были выполнены оценки температуры во время различных солнечных событий, что позволило получить важную информацию о процессах на Солнце. В работе [9] приводятся результаты еще одного эксперимента по наблюдению Солнца в мягком рентгеновском

диапазоне — на кубсате *SUNSTORM 1* формата 2U. Из графиков сравнения *SUNSTORM 1* с показаниями *GOES* следует, что мониторинг Солнца в мягком рентгеновском излучении можно осуществлять и с помощью группировки кубсатов, при условии обеспечения непрерывного режима наблюдений.

В МГУ имени М. В. Ломоносова разрабатывается программа “Универсат-СОКРАТ” [10], направленная на использование малых спутников для мониторинга космических угроз, в том числе радиации в околоземном пространстве и электромагнитных транзиентов. В рамках этой программы с 2019 г. был проведен успешный запуск нескольких кубсатов, среди результатов — наблюдение солнечных космических лучей и явлений космической погоды [6, 7, 10]. Наблюдение рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек в круг задач этих экспериментов не входило, но принципиально это было возможно благодаря наличию сцинтилляционных детекторов достаточной эффективной площади.

Сейчас появляются проекты миссий кубсатов, направленные непосредственно на наблюдение солнечных вспышек в жестком рентгеновском излучении. Например, в публикации [11] рассказано о проекте Итальянского космического агентства CUSP, предполагающего создание группировки из двух кубсатов для измерения линейной поляризации солнечных вспышек в диапазоне энергий 20–100 кэВ с помощью поляриметров комптоновского рассеяния. В работе [12] говорится о первых результатах двух чешских кубсатов — *GRBAlpha* (1U) и *VZLUSAT2* (3U), научные задачи которых направлены, прежде всего, на наблюдение космических гамма-всплесков. Для этого на борту *GRBAlpha* (запуск состоялся в марте 2021 г.) был установлен детектор на основе CsI(Tl) размером 75 × 75 × 5 мм, работающий в диапазоне ~30–900 кэВ. На кубсате *VZLUSAT2*, запущенном в январе 2022 г., был размещен аналогичный детектор вдвое большего размера. Среди первых результатов *VZLUSAT2* помимо нескольких гамма-всплесков значатся две солнечные вспышки, произошедшие 21.IV.2022 и 20.V.2022, приведены их временные профили с временным разрешением 1 с. В работе [13] эксперимент *GRBAlpha* описывается подробнее, сообщается о 9 наблюдавшихся солнечных вспышках. На сайте <https://monoceros.physics.muni.cz/hea/GRBAlpha/> (дата просмотра 3.III.2024) приведен обновляющийся каталог наблюдавшихся этим кубсатом событий, включающий по состоянию на начало марта 2024 г. как

минимум, 36 солнечных вспышек. Для каждой из них доступны временные профили (кривые блеска) в четырех энергетических каналах, начиная с ~70 кэВ.

Таким образом, использование кубсатов, при должной организации эксперимента, позволяет получить качественные данные о потоках и спектрах жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек. Далее обсудим возможности наблюдения ЖРИ солнечных вспышек в более простых и не специализированных экспериментах, на примере группировки кубсатов МГУ имени М. В. Ломоносова, работающих с середины 2023 г. по настоящее время.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

В настоящей работе использовались данные о потоках жесткого рентгеновского излучения, полученные с нескольких кубсатов, выведенных 27.VI.2023 на солнечно-синхронную орбиту высотой ~550 км и наклоном 98°. Это спутники *Авион*, *Монитор-2*, -3, -4 и *UTMN-2*, на которых в качестве полезной нагрузки установлены сцинтилляционные детекторы ДеКоР, ДеКоР-2 и ДеКоР-3 для регистрации жесткого рентгеновского и гамма-излучения и заряженных частиц, специально разработанные в НИИЯФ МГУ для подобных экспериментов.

Спутники *Авион* и *Монитор-2* наряду с традиционными радиопередатчиками в УКВ-диапазоне оснащены передатчиками в S-диапазоне, позволяющими проводить фактически непрерывные измерения.

Подробное описание приборов ДеКоР-1, ДеКоР-2 и ДеКоР-3 приведено в статье [14]. Жесткое рентгеновское излучение регистрируется с помощью сцинтилляционного кристалла CsI(Tl), геометрическая площадь и толщина которого для каждого прибора указана в табл. 1. Перед кристаллом CsI(Tl) располагается тонкий слой пластического сцинтиллятора, служащий одновременно детектором заряженных частиц (в основном, электронов) и активной защитой для канала CsI(Tl), использующей разделение событий в разных сцинтилляторах по форме светового импульса на выходе фотоприемников.

Основные параметры экспериментов приведены в табл. 1.

Основным типом передаваемых данных в рассматриваемых экспериментах является мониторинг с временным разрешением 1 с., причем имеется возможность в процессе полета изменить

Таблица 1. Параметры кубсатов группировки Московского университета, выведенных на орбиту 27.VI.2023, а также установленных на них детекторов

Название проекта	Формат	Частотный диапазон связи	Возможный объем передаваемой информации	Установленные приборы	Диапазон энергий ЖРИ (на 1.III.2024)	Площадь и толщина CsI(Tl)
Авион	6U	УКВ, S	~50 МБ/сут	ДеКоР-1	>40 кэВ	18 см ² × 1 см
				ДеКоР-2	>80 кэВ	64 см ² × 1 см
				ДеКоР-3	>30 кэВ	9 см ² × 3 см
Монитор-2	3U	УКВ, S	~50 МБ/сут	ДеКоР-2	>80 кэВ	64 см ² × 1 см
				ДеКоР-3	>100 кэВ	36 см ² × 4 см
Монитор-3	3U	УКВ	~0.3 МБ/сут	ДеКоР-2	>80 кэВ	64 см ² × 1 см
Монитор-4	3U	УКВ	~0.3 МБ/сут	ДеКоР-2	>80 кэВ	64 см ² × 1 см
UTMN-2	3U	УКВ	~0.3 МБ/сут	ДеКоР-2	>80 кэВ	64 см ² × 1 см

это значение в несколько раз, как в большую, так и в меньшую сторону. Нижний порог регистрации квантов составляет несколько десятков кэВ, он также может быть изменен в процессе полета, с учетом фоновых условий на околоземной орбите, при этом детекторы можно настроить неодинаково. Значения порогов для каждого детектора на момент 1.III.2024 указаны в табл. 1.

Отметим, что до этого момента, на этапе полетных испытаний, можно было использовать только интегральные каналы (сумма всех событий больше определенной пороговой энергии). В области высоких энергий каналы не ограничены насыщением электроники, поскольку приборы настроены так, что частица, вызвавшая насыщение, будет зарегистрирована. Согласно калибровкам насыщение электроники наступало при энергиях 1.5 МэВ для ДеКоР-1 спутника *Авион* и 3.5 МэВ для ДеКоР-3. Частицы с большими энергиями не вносят значимый вклад в скорости счета из-за их малых потоков.

Также заметим, что достаточно высокие пороги >80 кэВ для всех установленных приборов ДеКоР-2 вызваны тем, что в процессе летных испытаний в этот период на их кремниевые фотумножители (silicon photomultipliers, SiPM) подавался пониженный уровень напряжения по сравнению с наземными калибровками, в которых пороговые значения составляли ~30 кэВ.

В настоящее время этап полетной отработки фактически закончен, в дальнейшем на Землю со спутника *Авион* будут передаваться не только интегральные мониторинговые каналы. Например, для прибора ДеКоР-3 это будут

каналы, соответствующие энерговыделениям >30, 100–300 и 300–3000 кэВ.

В экспериментах также реализован режим “по-событийной записи”, при котором на Землю передается время регистрации каждого взаимодействия с микросекундной точностью, а также параметры сцинтилляции, позволяющие определить энергию и тип события (квант или частица).

Данные кубсатов группировки МГУ доступны в виде графиков и таблиц данных мониторинга на сайте космической погоды НИИЯФ МГУ по адресу <https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.php>.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Список солнечных вспышек, во время которых было зарегистрировано жесткое рентгеновское излучение в экспериментах на кубсатах *Авион* и *Монитор-4* в период с сентября 2023 г. по февраль 2024 г. приведен в табл. 2.

На рис. 1 (средняя панель) приведена зависимость от времени скоростей счета прибора ДеКоР-3, установленного на спутнике *Авион*, во время вспышки класса М6.8 29.I.2024. Показан не только момент регистрации ЖРИ (на рис. 1 он отмечен желтым прямоугольником), а более широкий временной интервал (40 мин), включающий начало и максимум интенсивности МРИ по данным *GOES*. На верхней панели рис. 1 показаны данные *GOES* в каналах 0.1–0.8 и 0.05–0.4 нм, а также, для оценки производной в этих каналах, построены разности текущего значения и предыдущего, измеренного минутой ранее.

Таблица 2. Список солнечных вспышек, наблюдавшихся в жестком рентгеновском излучении на кубсатах группировки МГУ

№	Дата	Время МРИ GOES	Класс	Кубсат	Время ЖРИ	Длительность
1	19.IX.2023	20:01 – 20:14 – 20:21	M4.0	Авион	20:09 – 20:10	>1 мин (виден только конец)
2	1.X.2023	03:21 – 03:24 – 03:30	C9.3	Авион	03:23 – 03:23	10 с
3	2.XI.2023	12:18 – 12:22 – 12:26	M1.6	Авион	12:22 – 12:22	<20 с
4	15.XII.2023	07:03 – 07:15 – 07:23	M6.3	Монитор-4	07:09 – 07:16	7 мин
5	4.I.2024	01:10 – 01:16 – 01:22	M1.1	Авион	01:12 – 01:14	2 мин
6	29.I.2024	03:54 – 04:38 – 05:15	M6.8	Авион	04:16 – 04:21	5 мин
7	8.II.2024	18:56 – 19:02 – 19:06	M1.3	Авион	19:01 – 19:02	25 с
8	9.II.2024	12:53 – 13:14 – 13:32	X3.3	Авион	13:04 – 13:07	3 мин
9	22.II.2024	22:08 – 22:34 – 22:43	X6.3	Авион	22:25 – 22:42	17 мин

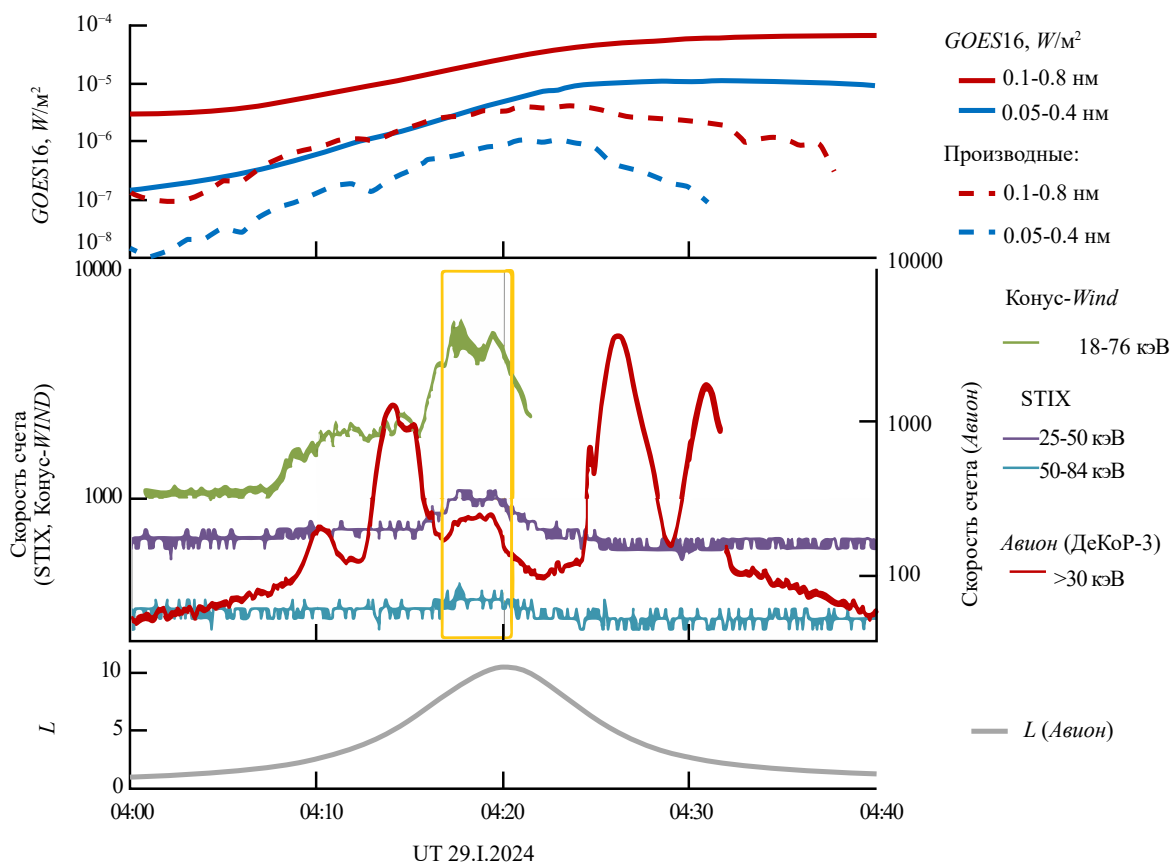


Рис. 1. Временной ход мягкого (*GOES*) и жесткого рентгеновского излучения (*Авион*, *Konus-WIND*, *STIX*) во время вспышки 29.I.2024 (начало 03:54 UT), а также параметр МакИллвайна *L* для кубсата *Авион* во время вспышки

За время с 04:00 до 04:40 *Авион*, совершил почти пол-оборота вокруг Земли, следовательно, дважды пересек внешний радиационный пояс планеты. Поэтому большинство возрастаний скоростей счета ДеКоР-3 связаны не со вспышечном излучением, а с тормозным излучением электронов внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ). Тем не менее вспышку на кубсате *Авион* удалось зарегистрировать, поскольку во время наблюдения ЖРИ от вспышки спутник

находился в области полярной шапки, об этом свидетельствуют значения параметра МакИл-лвайна L [15], график которого представлен на нижней панели рис. 1. L — это параметр, принятый в физике магнитосферы, описывающий определенный набор силовых линий планетарного магнитного поля. Например, $L = 2$ описывает набор силовых линий магнитного поля Земли, которые пересекают магнитный экватор Земли на расстоянии двух земных радиусов от центра Земли. Можно сказать, что L это некий аналог магнитной широты, только в отличие от широты, положительный как для северного, так и для южного полушария.

Для подтверждения факта, что возрастание, наблюдавшееся в таких сложных фоновых условиях, действительно связано с вспышечным ЖРИ, было проведено сравнение данных, полученных в эксперименте на кубсате *Авион*, с результатами наблюдений вспышечного излучения, зарегистрированного в других экспериментах. На средней панели рис. 1 помимо данных *Авион* показаны также данные *Konus-WIND* [16] с сайта <https://ioffe.ru/LEA/Solar/index.ru.html> (дата просмотра 1.III.2024), выбран канал 18–76 кэВ. Также использовались данные эксперимента с прибором STIX [17] на *Solar Orbiter*, доступные на сайте <https://datacenter.stix.i4ds.net/view/ql/lightcurves> (дата просмотра 1.III.2024). Построены два канала, наиболее близкие к энергетическому диапазону ДеКоР-3, а именно: 25–50 и 50–84 кэВ. Отметим, что и *Solar Orbiter*, и *WIND* — спутники “классических” размеров, проводящие измерения за пределами радиационных поясов Земли. Спутник *Solar Orbiter* в момент вспышки 29.I.2024 находился на расстоянии ~ 0.9 а.е. от Солнца (на рис. 1 учтена задержка ~ 40.3 с). Угол, под которым прибор STIX видел Солнце, отличался от околоземных экспериментов на 25.4° .

То, что временной профиль ЖРИ, полученный на *Авион*, как видно из рис. 1, совпадает по времени, и имеет сходную форму с профилями, измеренным на *Konus-WIND* и *Solar Orbiter*, подтверждает факт наблюдение ЖРИ от этой вспышки, а также косвенно указывает на то, что энергетический порог прибора ДеКоР-3 соответствует калибровочному значению 30 кэВ.

Для выяснения того, связано ли в сложной фоновой обстановке то или иное возрастание с солнечной вспышкой, можно также использовать сопоставление временных профилей солнечных вспышек в ЖРИ с производной МРИ, определяемой по данным *GOES*, предполагая наличие эффекта Ньюперта [4]. Однако

этот способ работает только в случае совпадения профилей (т.е. при подтверждении), различия в профилях могут наблюдаться также когда эффект Ньюперта во вспышке не выполняется. Временные профили, приведенные на рис. 1, как раз показывают данную ситуацию для вспышки 29.I.2024, когда эффект Ньюперта не выполнен.

На рис. 2 приведен еще один характерный пример солнечной вспышки, наблюдавшейся в ЖРИ на спутнике *Авион*. Были использованы данные прибора ДеКоР-1.

Это вспышка 2.XI.2023 класса M1.6, наблюдавшаяся на *GOES* в мягком рентгеновском излучении с 12:18 по 12:26 с максимумом в 12:22. Данное вспышка была зарегистрирована при прохождении спутником *Авион* экваториальной области, что сняло проблему отделения вспышечного излучения от тормозного излучения электронов внешнего РПЗ. На верхней панели рис. 2 также приведены данные *GOES* по регистрации МРИ, на нижней панели вместе с данными *Авион* приведены данные экспериментов *Konus-WIND* и STIX (*Solar Orbiter*). Как видно из рис. 2, приведенные профили ЖРИ, измеренные во всех трех экспериментах хорошо совпадают между собой в каналах, близких по энергиям, но временного разрешения в экспериментах на *Авион* и *Konus-WIND* оказалось достаточно, чтобы разделить два пика в максимуме ЖРИ вспышки. Судя по совпадению временных профилей, полученных на *Авион* и *Konus-WIND*, несколько более мелких возрастаний, произошедших с 10-й по 20-ю секунду после начала вспышки, также являются значимыми.

Следует обратить внимание на то, что многие вспышки, приведенные в табл. 2, — очень короткие по длительности события, а треть из них, включая 2.XI.2023, наблюдалась в ЖРИ менее минуты. Форма импульса ЖРИ от таких вспышек близка к форме гамма-всплесков астрофизического происхождения, поэтому такие вспышки будут, подобно гамма-всплескам, вызывать в приборах для их наблюдения срабатывание всплескового режима, который, как правило, используется для подробной записи кривой блеска. Именно такое срабатывание позволило получить профиль вспышки 2.XI.2023 на *Konus-WIND* с временным разрешением 0.064 с. Данные эксперимента *Konus-WIND*, приведенные на рис. 2 (https://gcn.gsfc.nasa.gov/notices_k/auto/konus_20231102.44522, дата просмотра 23.IV.2024), взяты с сайта General Coordinates Network (GCN) — сетевого ресурса сообщества по изучению астрофизических

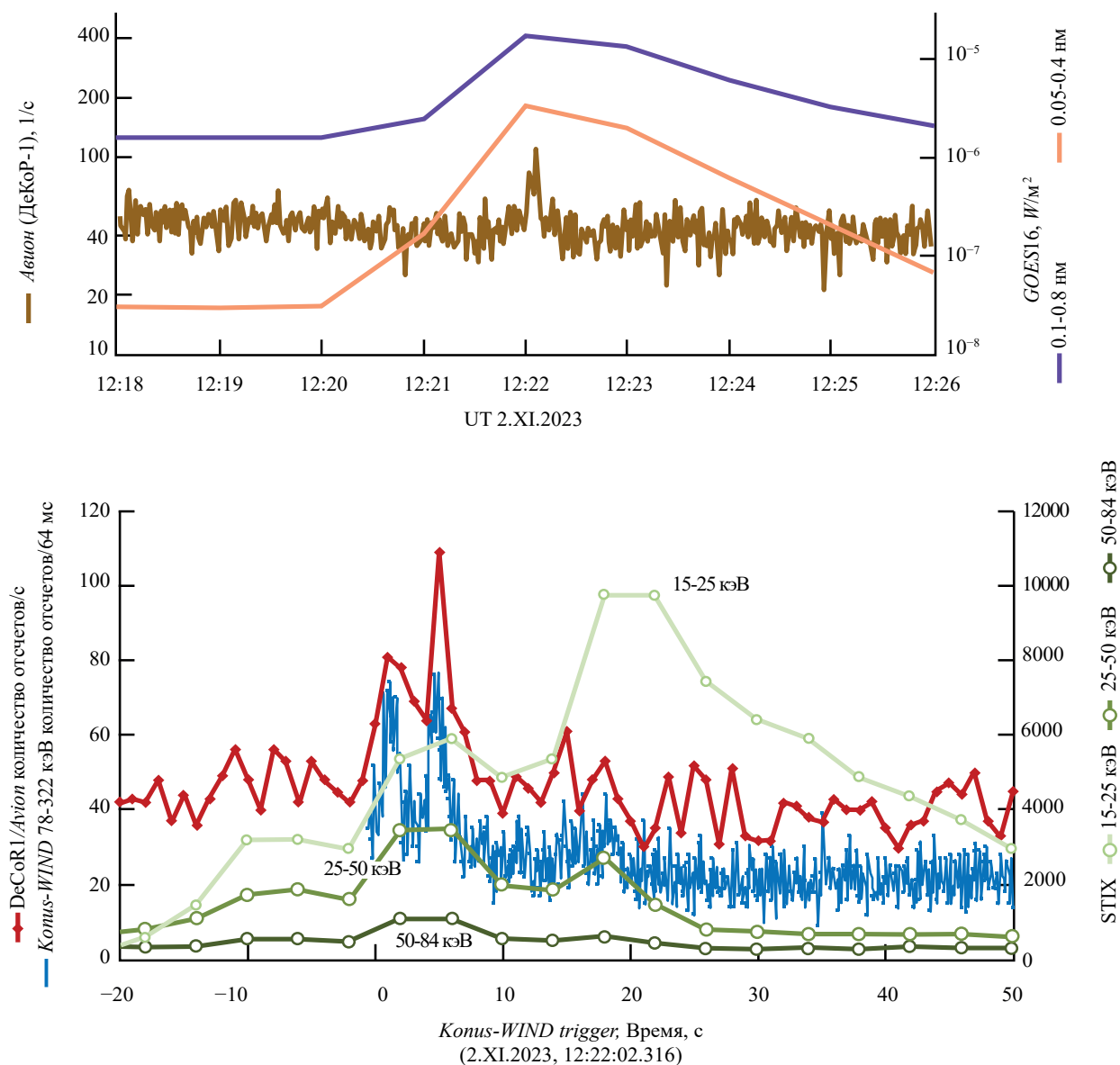


Рис. 2. Временной ход мягкого (GOES) и жесткого рентгеновского излучения (прибор ДеКоР-1 на спутнике *Авион*, *Konus-WIND*, STIX) во время вспышки 02.XI.2023 (начало 12:18 UT)

гамма-всплесков. Подобную практику использования всплескового режима для солнечных вспышек небольшой длительности можно осуществлять и в экспериментах на кубсатах. Однако в более длительных вспышках с медленным нарастанием ЖРИ триггер либо не сработает, либо его будет сложно настроить из-за ложных срабатываний от тормозного излучения частиц радиационных поясов. Кроме того, при использовании только триггерного режима вспышки большой длительности будут записаны не до конца. Это еще раз подчеркивает важность

совмещения непрерывных мониторинговых измерений с временным разрешением не хуже 1 с и записи отдельных событий с максимальной подробностью, ограниченной, прежде всего, возможностью передачи данных на Землю.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные на спутнике *Авион*, продемонстрировали, что применение кубсатов для наблюдения жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек возможно, например,

если в качестве полезной нагрузки установить на кубсат сцинтилляционный детектор. Преимуществом становится то, что кубсат — достаточно простой и недорогой аппарат, подготовка эксперимента, как правило, проходит в более краткие сроки, требования к аппаратуре менее жесткие и т.п. Однако при постановке эксперимента на кубсате приходится решать многие технические вопросы, которые на “классических” спутниках оказываются уже решенными.

Во-первых, ограничено количество информации, которое возможно передать на Землю. Большинство кубсатов использует для этого УКВ-диапазон, позволяющий передавать менее 1 Мб/сутки. Это соответствует примерно одному витку в сутки мониторинговых измерений в нескольких каналах с частотой один раз в секунду. Естественно, рассчитывать на то, что именно во время этого витка произойдет солнечная вспышка, не приходится. Одним из способов решения данной проблемы является управление тем, за какой интервал времени требуется переслать данные. На кубсате может быть установлена внутренняя память, в которую непрерывно работает детектор записывает показания. Если эта память обеспечит хранение данных в течение нескольких недель, то исследователь, зная время вспышки, может запросить по команде с Земли сброс информации именно за этот период.

Проблема с проведением непрерывных мониторинговых наблюдений стоит не так остро, если передача телеметрии с кубсата предусмотрена не в УКВ, а в S-диапазоне. Однако в любом случае для проведения непрерывных наблюдений нужно еще и обеспечение электроэнергией непрерывно включенного детектора.

В настоящее время непрерывные наблюдения Солнца в ЖРИ ведутся на многих космических аппаратах. Как правило, в этих экспериментах получают временные профили вспышек примерно с секундным разрешением, и кубсаты МГУ здесь не исключение. Сейчас частота кадров мониторинга на спутнике *Авион* уменьшена до 0.5 с. Для обеспечения еще более подробных профилей (с миллисекундным разрешением и даже лучше), а также многоканальных спектров излучения на всех кубсатах группировки МГУ, запущенных в 2023 г. (*Авион*, *Монитор-2*, -3, -4, *UTMN-2*) предусмотрен еще один режим записи информации с детекторов — “по-событийная запись”. Фиксируется время каждого взаимодействия кванта или частицы в детекторе с микросекундной точностью, а также амплитуда сцинтилляции в два момента времени, позволяющая

точно определить сорт частицы и ее энергию. Эту, по сути первичную, информацию предполагается также сбрасывать с последующей обработкой уже на Земле. Такая информация занимает гораздо больше места, чем мониторинговая, поэтому включение данного канала должно осуществляться в триггерном режиме (например, по моменту резкого возрастания скоростей счета, когда спутник находится в районе экватора). На данный момент “пособытийная запись” с кубсатов МГУ используется только в тестовом режиме для калибровок детекторов.

При регистрации рентгеновского излучения солнечных вспышек приходится учитывать не только сложные фоновые условия на околоземной орбите, но и вращение аппарата. Как правило, на небольших недорогих кубсатах системы, поддерживающие стабильную ориентацию, не предусмотрены, и аппарат испытывает вращение с периодом, который может составлять от нескольких секунд до минут. У кубсата *Авион* в феврале 2024 г. период вращения составлял несколько минут, это видно по вариациям скоростей счета в областях захваченной радиации, а также по показаниям магнитометров, входящих в состав полезной нагрузки спутника. По известным данным трехосного магнитометра, координатам спутника и модели геомагнитного поля можно определить направления осей кубсата, а следовательно, угол между детектором и Солнцем, необходимый для вычисления эффективной площади детектора в любой момент времени.

Один кубсат, работающий на околоземной полярной орбите высотой ~550 км, не может обеспечить непрерывный мониторинг Солнца. Во-первых, из-за экранирования Землей — так, в феврале 2024 г. спутник *Авион* находился в тени Земли примерно треть времени. Во-вторых, в зонах повышенной радиации наблюдения также невозможны как из-за величины фона, так и из-за его вариаций. Спутник *Авион*, а также другие кубсаты МГУ, имеющие сходную орбиту, ~30 % времени находится в радиационных поясах. Наблюдения возможны на экваторе (~50 % времени), а также в области полярных шапок (~20 % времени), где фон стабильный, хотя и повышенный. Проблему, связанную с невозможностью проводить непрерывные наблюдения как из-за нахождения в тени, так и из-за фоновых условий, может помочь решить использование группировки кубсатов, находящихся в различных точках околоземного космического пространства.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За первые месяцы работы спутников *Авион*, *Монитор-2*, -3, -4 и *UTMN-2*, выведенных на околоземную полярную орбиту 27.VI.2023, было зарегистрировано жесткое рентгеновское излучение с энергией >30 кэВ от девяти солнечных вспышек. Отметим, что эти кубсаты не разрабатывались специально для исследований Солнца, основные их задачи связаны с космической погодой – мониторингом радиации в околоземном космическом пространстве, и астрофизическими проблемами – регистрацией гамма-всплесков. Тем не менее, полученные временные профили вспышек, согласующиеся с данными *Konus-WIND*, *STIX (Solar Orbiter)* и других экспериментов, свидетельствуют о возможности использовать такие достаточно простые наноспутники, в том числе, для наблюдения солнечного жесткого рентгеновского излучения.

Все пять кубсатов группировки МГУ функционируют штатно, ведутся мониторинговые наблюдения. В настоящий момент проводится оптимизация настроек детекторов (энергетических порогов, временного разрешения каналов мониторинга, и т.п.), отработка режима “пособытийной записи” и использования магнитометров для определения направления осей спутника. Таблица зарегистрированных вспышек регулярно пополняется.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-42-10005, <https://rscf.ru/project/23-42-10005/>, а также научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова “Фундаментальные и прикладные исследования космоса”, проект №24-Ш01-05 “Созвездие 270”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S. et al.* An Observational Overview of Solar Flares // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 159. Iss. 19.
2. *Benz A.O.* Flare Observations // *Living Reviews in Sol. Phys.* 2017. V. 14. Iss. 2. <https://doi.org/10.1007/s41116-016-0004-3>
3. *Цап Ю.Т., Мельников В.Ф.* Температура бесстолкновительной плазмы и бетатронное ускорение казипетловых электронов в солнечных вспышках // *Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика*. 2023. Т. 49. № 4. С. 289–298.
4. *Neupert W.M.* Comparison of Solar X-Ray Line Emission with Microwave Emission during Flares // *Astrophys. J. Lett.* 1968. V. 153. Iss. L59.
5. *Григорьева И.Ю., Струминский А.Б.* О необходимых и достаточных условиях солнечных протонных вспышек // *Сб. тез. Восемнадцатая ежегодная конференция “Физика плазмы в Солнечной системе”*. ИКИ РАН, 2023. с. 126.
6. *Bogomolov A.V., Bogomolov V.V., Iyudin A.F. et al.* Space weather effects from observations by Moscow university cubesat constellation. // *Universe*. 2022. V. 8. Iss. 282. DOI: 10.3390/universe8050282
7. *Богомолов А.В., Богомолов В.В., Иудин А.Ф. и др.* Наблюдения солнечных космических лучей с помощью наноспутников формата кубсат // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2024. Т. 88. № 2. с. 314–318. <https://doi.org/10.31857/S0367676524020266>
8. *Woods T.N., Schwab B., Sewell R. et al.* First Results for Solar Soft X-Ray Irradiance Measurements from the Third-generation Miniature X-Ray Solar Spectrometer // *The Astrophysical J.* 2023. V. 956. Iss. 94. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/acef13>
9. *Lehtolainen A., Huovelin J., Korpela S. et al.* SUNSTORM 1/X-ray Flux Monitor for CubeSats (XFM-CS): Instrument characterization and first results // *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*. 2022. Iss. A 1035. Art.ID. 166865. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166865>
10. *Богомолов В.В., Богомолов А.В., Дементьев Ю.Н. и др.* Первый опыт мониторинга космической радиации в мультиспутниковом эксперименте Московского университета в рамках проекта “Универсат-СОКРАТ” // *Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика, астрономия*. 2020. № 6. С. 135–141.
11. *Fabiani S., Baffo I., Bonomo S. et al.* CUSP: a two cubesats constellation for Space Weather and solar flares X-ray polarimetry // *arXiv:2208.06211v1 [astro-ph.SR]* 12 Aug 2022.
12. *Ripa J., Pal A., Ohno M. et al.* Early results from GRBAlpha and VZLUSAT-2 // *arXiv:2207.03272v2 [astro-ph.IM]* 15 Jul 2022.
13. *Pal A., Ohno M., Meszaros L. et al.* GRBAlpha: The smallest astrophysical space observatory // *Astronomy and Astrophysics*. 2023. V. 677. Iss. A40. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346182>
14. *Bogomolov V., Svertilov S., Osedlo V. et al.* Advanced Instruments for Geo and Helio Environment Monitoring on the Cubesat Format Spacecraft // *Proc. XIII International Conference “Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors”*. Paratunka, Kamchatka, Russia. Springer, 2023.

- ISBN978-3-031-50247-7. P. 104–112. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50248-4_11
15. *McIlwain C.E.* Coordinates for Mapping the Distribution of Magnetically Trapped Particles // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66. P. 3681–3691.
16. *Aptekar R.L., Frederiks D.D., Golenetskii S.V. et al.* Konus-W Gamma-Ray Burst Experiment for the GGS Wind Spacecraft // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 71. Iss. 265.
17. *Krucker S., Hurford G.J., Grimm O. et al.* The Spectrometer/Telescope for Imaging X-rays (STIX) // *Astronomy & Astrophysics.* 2020. V. 642. Iss. A15.

OBSERVATIONS OF HARD X-RAY EMISSION OF SOLAR FLARES ON THE CUBSAT SATELLITES OF THE MOSCOW UNIVERSITY GROUP

© 2025 A. V. Bogomolov^{1, *}, V. V. Bogomolov^{1, 2}, A. F. Iyudin¹,
I. N. Myagkova¹, S. I. Svertilov^{1, 2}

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia*

*e-mail: aabboogg@srd.sinp.msu.ru

The possibilities of using cubesat nanosatellites to detect the hard X-ray radiation (HXR) from solar flares are shown. The results of HXR measurements of several flares in the energy range >30 keV using the DeCoR-1 and DeCoR-3 instruments installed on the *Avion* satellite are presented, as well as a table of flares observed in HXR on the MSU constellation cubesats from September 2023 to February 2024.