

УДК 537.591.5

МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ УГРОЗ: РЕЗУЛЬТАТЫ МИССИИ *ЛОМОНОСОВ* И ПРОЕКТ УНИВЕРСАТ-СОКРАТ

© 2019 г. В. А. Садовничий¹, М. И. Панасюк¹, В. М. Липунов¹, А. В. Богомолов¹, В. В. Богомолов¹, Г. К. Гарипов¹, Е. С. Горбовской¹, Д. С. Зимнухов¹, А. Ф. Июдин¹, М. А. Казначеева¹, В. В. Калегаев¹, П. А. Климов¹, А. С. Ковтюх¹, В. Г. Корнилов¹, Н. В. Кузнецов¹, И. А. Максимов¹, С. К. Мить¹, В. И. Оседло¹, В. Л. Петров¹, М. В. Подзолко¹, Е. П. Попова¹, А. Ю. Поройков¹, И. А. Рубинштейн¹, К. Ю. Салеев¹, С. И. Свертилов¹*, В. И. Тулупов¹, Б. А. Хренов¹, В. В. Чазов¹, А. С. Чепурнов¹, Я. А. Штундер¹, А. Н. Шустова¹, И. В. Яшин¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

*sis@coronas.ru

Поступила в редакцию 03.12.2017 г.

После доработки 01.04.2018 г.

Принята к публикации 15.05.2018 г.

В статье рассматриваются результаты экспериментов на спутнике *Ломоносов* по наблюдению природных и техногенных космических угроз, в том числе электромагнитных транзиентов, космического мусора. Также обсуждается новый космический проект МГУ имени М.В. Ломоносова Универсат-СОКРАТ по созданию группировки спутников для мониторинга в реальном времени в околоземном космическом пространстве: радиационной обстановки; потенциально опасных объектов естественного (астероиды, метеороиды) и техногенного происхождения (космический мусор), а также космических и атмосферных гамма-всплесков, вспышек оптического и ультрафиолетового излучения из атмосферы Земли.

DOI: 10.1134/S0023420619010102

ВВЕДЕНИЕ

Естественная и “техногенная” космическая среда создает серьезные риски для осуществления космических миссий как роботизированных, так и с участием человека. Риск определяется спецификой планируемых миссий — их продолжительностью, локализацией в космическом пространстве и параметрами орбит.

Специфика природных условий в космическом пространстве (многообразие физических параметров радиационных полей, особенности баллистических траекторий природных космических объектов), а также последствия космической деятельности человека в космосе (загрязнение космического пространства техногенным мусором) создают, как правило, реальные трудности для моделирования обстановки и расчетов рисков. Мониторинг в реальном времени космических природных и техногенных объектов — потенциальных угроз представляет собой оптимальный и эффективный способ снижения рисков.

В экспериментах на Российском университетском спутнике *Ломоносов*, наряду с астрофизиче-

скими задачами [1] осуществлялось изучение и мониторинг радиации, электромагнитных транзиентных атмосферных явлений (далее, транзиентов или ТАЯ) и космического мусора в околоземном космическом пространстве, представляющих потенциальную опасность для осуществления космических миссий. В данной работе приведены некоторые результаты этих экспериментов.

Результаты экспериментов на спутнике *Ломоносов* и других спутниках МГУ по исследованию экстремальных явлений в атмосфере Земли и космическом пространстве [2–5] послужили основой для формирования программы нового проекта Московского университета Универсат-СОКРАТ¹, посвященного созданию группировки спутников для мониторинга в режиме, близком к реальному времени, в околоземном космическом пространстве потенциально опасных угроз, в том числе: радиационной обстановки, опасных объектов

¹ “Универсат” — английская аббревиатура: University Satellites. СОКРАТ — русская аббревиатура: Система оповещения космической радиационной, астероидной и техногенной опасности.

естественного (астероиды, метеоры) и техногенного происхождения (космический мусор), а также электромагнитных транзиентов – космических и атмосферных гамма-всплесков, вспышек оптического и ультрафиолетового излучения из атмосферы Земли. Цели и задачи этого проекта, а также основные требования к разрабатываемым новым приборам также рассматриваются в настоящей статье.

Успешная реализация проекта позволит впервые в мире создать прообраз космической системы мониторинга и предотвращения космических угроз как для осуществляемых, так и для планируемых космических миссий, включая высотные атмосферные летательные аппараты.

1. ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫЕ ФАКТОРЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

1.1. Ионизирующая радиация. Один из основных поражающих факторов, влияющих на работоспособность космических приборов и безопасность пилотируемых полетов, являются потоки заряженных частиц (протонов и электронов) высоких энергий радиационных поясов Земли, а также энергичных частиц солнечных космических лучей. Эти потоки испытывают очень значительные вариации на шкале времени от миллисекунд до десятков лет, которые не могут быть описаны существующими квазистатическими моделями радиационных поясов Земли (см., например, [6–8]). С другой стороны, существующие спутниковые измерения проводятся только для ограниченного числа орбит и диапазона питч-углов (угол между вектором скорости частицы и магнитной силовой линией) и не могут дать глобальную картину пространственно-временных вариаций радиации в околоземном космическом пространстве (ОКП). Поэтому возникает необходимость радиационного мониторинга и оперативного прогноза радиационного окружения Земли с целью: оперативной оценки радиационных условий в ОКП для оценки радиационных рисков выполнения космических миссий и выработки алертных сигналов для принятия решений по управлению ими; верификации современных расчетных моделей полей радиации околоземного космического пространства.

1.2. Космический мусор, астероиды и крупные метеороиды. По состоянию на 31.VIII.2015 г. общее количество находящихся в космическом пространстве и каталогизированных в базах данных “Систем предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве” космических объектов техногенного происхождения составило 17250 космических объектов. Из них 1362 космических объекта – это действующие космические аппараты, а остальные 15888 космических объектов – космический мусор [9].

При экстраполяции существующих темпов засорения низких околоземных орбит, даже с учетом различных мероприятий по его уменьшению, в среднесрочной перспективе может возникнуть “каскадный эффект” взаимного столкновения объектов и частиц космического мусора, который может в долгосрочной перспективе привести к катастрофическому росту количества объектов космического мусора на низких орбитах и, как следствие, к практической невозможности дальнейшего освоения космоса.

Также актуальна проблема астероидной опасности. Небесное тело считается потенциально опасным, если оно пересекает орбиту Земли на расстоянии менее 0.05 а. е. (~19.5 расстояний от Земли до Луны), и его диаметр превышает 100–150 м. Объекты таких размеров достаточно крупные, чтобы вызвать беспрецедентные разрушения на суше, либо огромное цунами в случае падения в океан. События таких масштабов происходят примерно раз в 10000 лет. На основе информации, полученной с космического телескопа *WISE*, специалисты оценивают наличие 4700 ± 1500 потенциально опасных объектов с диаметром более 100 м [10].

1.3. Электромагнитные транзиенты. Еще одним потенциально опасным явлением являются электромагнитные транзиенты в верхней атмосфере, которые наблюдаются в разных диапазонах длин волн – от радио- до гамма-диапазона. Среди этих явлений, достаточно достоверно экспериментально идентифицированы – TLE (Transient Luminous Events – световые вспышки преимущественно в ближнем ультрафиолетовом и красном диапазонах и TGF (Terrestrial Gamma Flashes – гамма-всплески земного происхождения). Эти явления могут быть связаны с высотными электрическими разрядами, возникающими при воздействии на мезосферу лавин убегающих электронов, высыпающимися из радиационных поясов энергичными электронами и электромагнитными волнами, происходящими на высотах в десятки км в верхней атмосфере, и имеют глобальный характер [11–17]. Выделяемая в них энергия достаточно велика, чтобы оказать существенное воздействие на радиокommunikации, модифицировать физические параметры мезосферы, а также оказать непосредственное влияние на бортовые системы стратосферных суборбитальных летательных аппаратов (см., например, [18]).

Потенциальную опасность могут также представлять космические гамма-всплески астрофизического происхождения (см., например, [19]). Несмотря на большую удаленность источников, они во вселенной типа взрыва гиперновой, слияния нейтронных звезд, коллапса магнитного поля магнетара. Эффект воздействия достаточно редких, но очень интенсивных космических гамма-

Таблица 1. Временные характеристики разных режимов работы детектора ТУС

Режим работы	Временное разрешение, τ	Временная развертка
ШАЛ	0.8 мкс	256 $\tau = 205$ мкс
Короткие ТАЯ	25.6 мкс	256 $\tau = 6.6$ мс
Длинные ТАЯ	0.4 мкс	256 $\tau = 105$ мс
Микрометеоры	6.6 мс	256 $\tau = 1.7$ с

всплесков на атмосферу Земли еще не вполне изучен, но в плане ионосферных возмущений он может быть сопоставим с вспышками на Солнце.

1.4. Антропогенные источники ионизирующей радиации в околоземном пространстве. Радионуклидные источники энергии, ядерные двигательные установки космических аппаратов представляют собой потенциальную угрозу для других космических аппаратов, находящихся вблизи первых. Обнаружение и определение физических характеристик “ядерно-активных” космических аппаратов – важный элемент снижения радиационных рисков [20, 21].

2. НАБЛЮДЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА СПУТНИКЕ ЛОМОНОСОВ

2.1. Миссия Ломоносов. Космический аппарат *Ломоносов* был запущен 28.IV.2016 г. с космодрома “Восточный” на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой ~500 км, наклонением 98° и периодом обращения ~90 мин. Научная аппаратура на спутнике *Ломоносов* включает инструмент ТУС, предназначенный для регистрации треков широких атмосферных ливней (ШАЛ) от космических лучей предельно высоких энергий по ионизационному свечению [22], а также комплекс приборов для изучения космических гамма-всплесков, в том числе гамма-детекторы БДРГ [23], оптические камеры широкого поля зрения (ШОК) [24] и ультрафиолетовый (УФ) и рентгеновский телескоп UFFO [25]. Все приборы работают в режиме непрерывных измерений, поэтому обеспечивается возможность одновременной регистрации событий, в том числе в оптическом, УФ, рентгеновском и гамма диапазонах.

2.2. Наблюдения транзиентных атмосферных явлений. Для наблюдений атмосферных электромагнитных транзиентов в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах использовался орбитальный телескоп ТУС (Трековая Установка). Это первый в мире прибор, предназначенный для регистрации треков космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ) – частиц с энергией больше $7 \cdot 10^{19}$ эВ в атмосфере Земли с борта искусственного спутника. Однако методика изме-

рений позволяет исследовать различные быстропротекающие процессы в атмосфере на разных временных шкалах (см. далее).

Прибор ТУС представляет собой телескоп-рефлектор, состоящий из зеркала-концентратора френелевского типа большой площади (~2 м²) и фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости. Фотоприемник является матрицей из $16 \times 16 = 256$ фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) типа Hamamatsu R1463. Перед каждым ФЭУ стоит фильтр, пропускающий только УФ излучение в диапазоне 240–400 нм. Телесный угол обзора ячейки составляет 10^{-4} ср, что в атмосфере соответствует наблюдению квадрата 5×5 км [22, 26].

В работе детектора ТУС предусмотрено четыре режима с разным временным разрешением и длительностью временной развертки (см. табл. 1). Поэтому с помощью детектора ТУС можно изучать различные явления, происходящие в атмосфере Земли. Первый режим предназначен для регистрации широких атмосферных ливней от КЛПВЭ и коротких (менее 1 мс) транзиентов, второй и третий – для измерения молниевых разрядов и ТАЯ, четвертый – для регистрации метеоров и грозовых процессов длительностью больше 1 с.

В зарегистрированных детектором ТУС событиях было выделено несколько классов вспышек, имеющих характерную временную структуру [27]. Грозы являются главным источником кратковременного ультрафиолетового излучения в атмосфере, которое регистрируется детектором во всех режимах работы. Таким образом, с помощью детектора ТУС оказалось возможным наблюдать молниевый разряд с различным временным разрешением. На рис. 1 показаны характерные сигналы при регистрации молниевых разрядов для трех режимов работы детектора: а) события, зарегистрированные в режиме “ШАЛ” (с временным разрешением 0.8 мкс), имеющие плавное нарастание сигнала в течение 100 мкс; б) события с явно выраженной временной структурой, зарегистрированные в режиме “Длинные ТАЯ” (с временным разрешением 0.4 мс); в) многопиковая структура грозовой активности в режиме “Микрометеоры” (с временным разрешением 6.6 с).

Анализ пространственной структуры событий показал, что большая часть событий регистрируется всем фотоприемником одновременно и не имеет явного центра сигнала – своеобразная равномерная засветка. Наиболее естественным объяснением данного эффекта является то, что детектор реагирует на вспышки вне поля зрения, а равномерный сигнал по всему фотоприемнику – следствие рассеяния УФ излучения на шероховатости зеркала. Действительно, в ходе предполетных испытаний было показано, что доля фокуси-

руемого света в изображение составляет 60%. Это означает, что оставшиеся 40% УФ сигнала, попадающего на зеркало, равномерно рассеивается и засвечивает все ячейки фотоприемника.

Поскольку телескоп ТУС обладает пространственным разрешением, это позволило надежно идентифицировать некоторые типы ТАЯ по характерной пространственно-временной динамике. В частности, события типа “эльф”. За время работы детектора ТУС на борту спутника *Ломоносов* было зарегистрировано более 15 высокоатмосферных транзитных событий эльф. Пример регистрации приведен на рис. 2. Эти события имеют форму расширяющегося кольца диаметром 100–400 км. Вспышки такого рода хорошо идентифицируются в экспериментальном наборе данных по характерной форме сигналов в каналах детектора, выстраивающихся в дугу, бегущую по матрице фотоприемника (см. рис. 2а–2в). Длительность эльфа – меньше миллисекунды, поэтому их динамика хорошо видна именно в режиме работы детектора с временным разрешением 0.8 мкс (режим ШАЛ) и не различима в других режимах.

2.3. Наблюдения метеоров и космического мусора. Прибор ТУС в принципе может использоваться для наблюдений метеоров, для чего предусмотрен специальный режим (см. табл. 1). Эффективность наземных наблюдений метеоров ограничивается главным образом изменением погодных условий, в то время, как орбитальные эксперименты свободны от этого недостатка. В метеорном режиме прибора ТУС обеспечивается временное разрешение 6.6 мс при полной записи оцифрованного сигнала (осциллограммы) длительностью 1.7 с. Этот режим более медленный, чем те, которые используются для наблюдений ШАЛ и электромагнитных транзитов. Он также позволяет регистрировать длительную структуру свечения грозного региона и свечение техногенного происхождения. Более или менее типичные метеоры со скоростями порядка $3 \cdot 10^6$ см/с могут быть эффективно зарегистрированы с помощью прибора ТУС по флуоресцентному свечению, возникающему вдоль трека метеора с пороговой кинетической энергией 25 Дж при периоде оцифровки около 10 мс [28].

В течение месяца работы в метеорном режиме были зарегистрированы десятки метеоров. Результаты наблюдений одного из таких событий представлены на рис. 3. Скорость метеора в предположении горизонтального движения в пределах поля зрения телескопа ТУС составила 50–60 км/с. Этот метеор был зарегистрирован 3.1.2017 г. в 14:31:08 UTC, во время максимума интенсивности метеорного дождя Квадрантид в 2017 г.

Эти измерения демонстрируют возможности использования орбитального флуоресцентного детектора КЛПВЭ для изучения метеоров, что

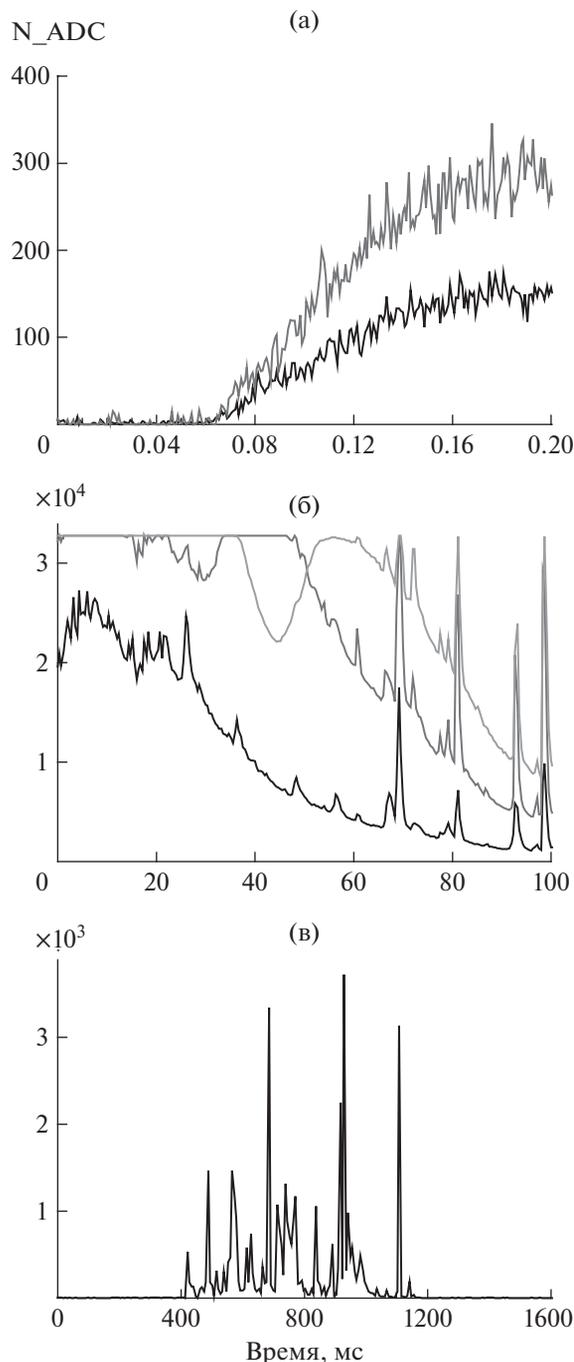


Рис. 1

подтверждает стратегию и оценки, сделанные для орбитального детектора следующего поколения JEM-EUSO для исследования метеоров [19, 30]. Было показано, что этот телескоп обладает возможностью наблюдать метеоры с блеском вплоть до звездной величины $M = +7$. С учетом большого поля зрения и высокой эффективности регистрации телескоп JEM-EUSO обеспечит регистрацию значимого потока метеоров, как одиночных событий, так и метеорных ливней.

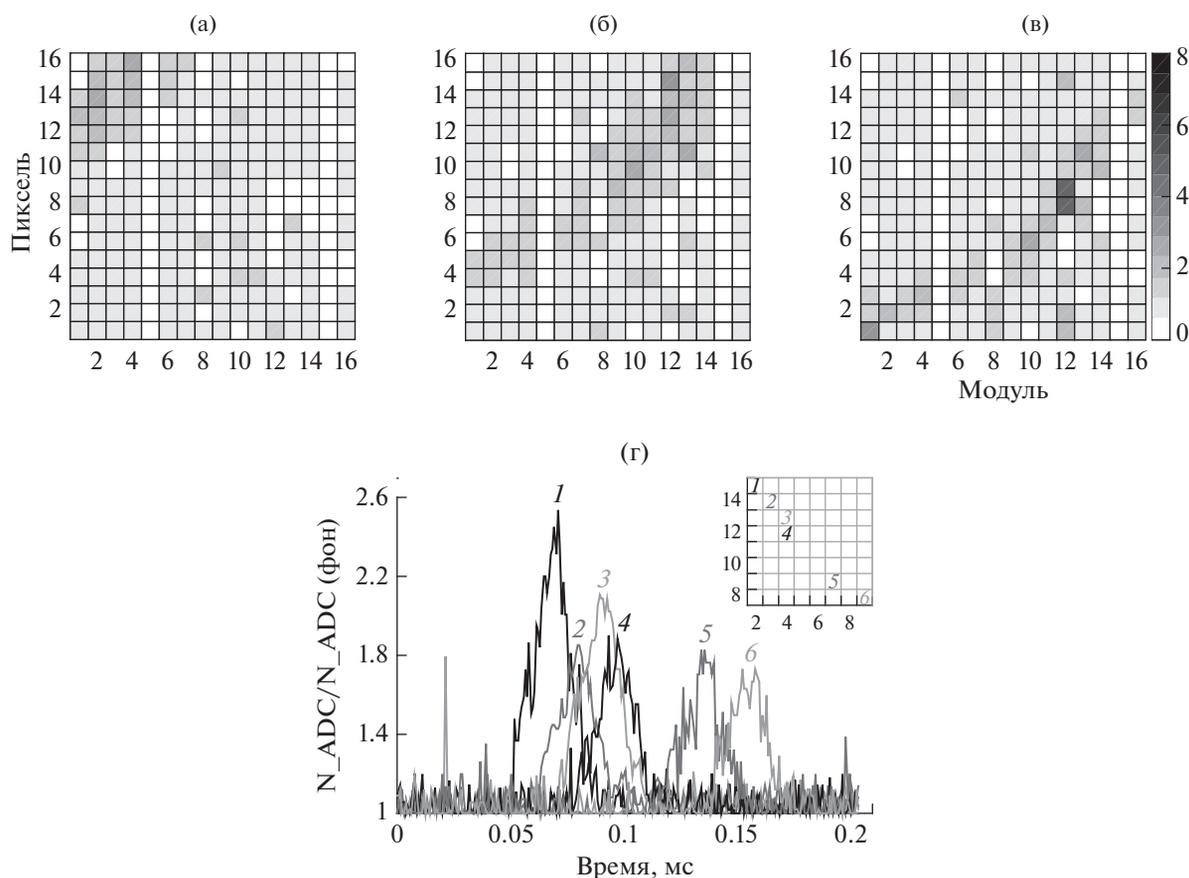


Рис. 2. Пример регистрации ТАЯ типа эльф детектором ТУС: а–в) карты каналов матрицы фотодетектора на 0.077, 0.174 и 0.182 мс от начала записи события; г) временные профили нескольких указанных пикселей фотодетектора. Географические координаты события: 17° E, 9° N.

На спутнике *Ломоносов* также проводились наблюдения оптическими средствами космических объектов искусственного происхождения, в том числе космического мусора. Для этого использо-

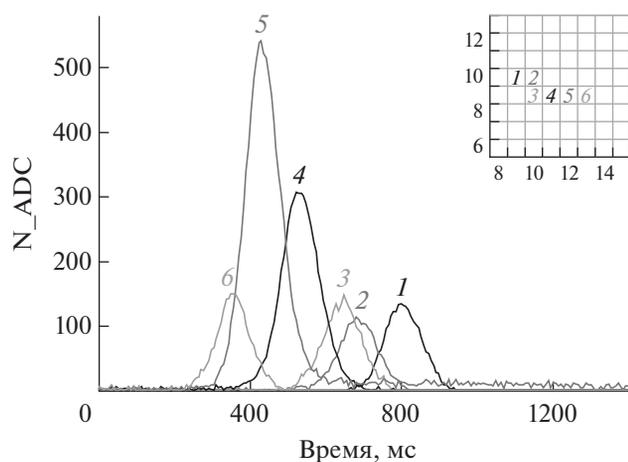


Рис. 3. Волновые формы засвеченных пикселей блока фотоприемников прибора ТУС во время регистрации метеорного события 3.I.2017 г., 14:31:08 UTC.

вались оптические камеры широкого поля зрения ШОК-1 и ШОК-2. Оба эти блока соединены непосредственно с центральным блоком электроники БИ, через который осуществляется связь с бортовыми системами и другими приборами комплекса. Основные характеристики камер ШОК приведены в табл. 2. Это камеры того же типа, что используются в наземной сети роботов-телескопов МАСТЕР для поиска оптических транзиентов, в том числе и КГВ [31, 32].

Каждая камера выполнена на основе объектива Nikkor и ПЗС матрицы Kodak KAI-11002. Камеры обладают чувствительностью на уровне 9–10^m звездной величины. Каждая камера ориентирована таким образом, что ее поле зрения находится в пределах поля зрения одного из гамма детекторов БДРГ. В блоках осуществляется непрерывная запись изображений с временным разрешением 0.2 с. В случае поступления триггера от блоков БДРГ или рентгеновского телескопа UVAT прибора UFFO, осуществляется фиксация данных за 1 мин до и 2 мин после триггера. Благодаря соосности с гамма-детекторами БДРГ это дает возможность регистрировать КГВ одновре-

менно обоими приборами и получать оптическое изображение, как непосредственно в момент, так и до всплеска. При этом выбранные временные интервалы фиксации данных перекрывают типичные времена между предвестником и всплеском. Предусмотрена возможность фиксации изображений ШОК по триггеру с Земли, т.е. по всплескам, фиксируемым мировой сетью GCN. Камеры также могут осуществлять наблюдения в режиме поиска оптических транзиентов – по собственному триггеру. В этом случае осуществляется автоматическое сравнение каждого последующего изображения с предыдущим и в случае изменения яркости или появления нового объекта, а поле зрения камеры изображение фиксируется. Этот режим может использоваться не только для наблюдений астрофизических явлений типа сверхновых, новых, но и для исследования космического мусора, метеоритной опасности и т.п.

Примеры идентификации быстро движущихся объектов 14.V.2016 г. с помощью широкопольных оптических камер на спутнике *Ломоносов* приведены на рис. 4.

3. КОНЦЕПЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ОСНОВЕ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ СПУТНИКОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ УГРОЗ

3.1. Группировка малых спутников для мониторинга космических угроз. Основываясь на опыте, полученном в ходе наблюдений на спутнике *Ломоносов*, предлагается новый проект Универсат-СОКРАТ, в рамках которого предполагается осуществить мониторинг потенциально опасных явлений на нескольких малых космических аппаратах [33]. В минимальном варианте предполагается использовать группировку из трех космических аппаратов: КА № 1 размещается на низкой солнечно-синхронной орбите высотой 500–650 км и наклоном 97°–98°, КА № 2 запускается на орбиту близкую к круговой с высотой 1400–1500 км и наклоном ~80°, КА № 3 запускается на эллиптическую орбиту с апогеем 8000 км, перигеем 600–700 км и наклоном 63.4°. Взаимное расположение орбит представлено на рис. 5.

На спутниках предполагается установить следующие приборы для космического мониторинга опасных объектов и явлений [34]: спектрометр электронов и протонов, широкопольные оптические камеры, комплекс приборов для изучения электромагнитных транзиентных явлений, включающий гамма-спектрометры, детекторы УФ и ИК излучения. При этом на КА № 1 должны быть установлены приборы: для мониторинга космической радиации, комплекс приборов для оптического мониторинга опасных объектов, комплекс научной аппаратуры для изучения ТАЯ в

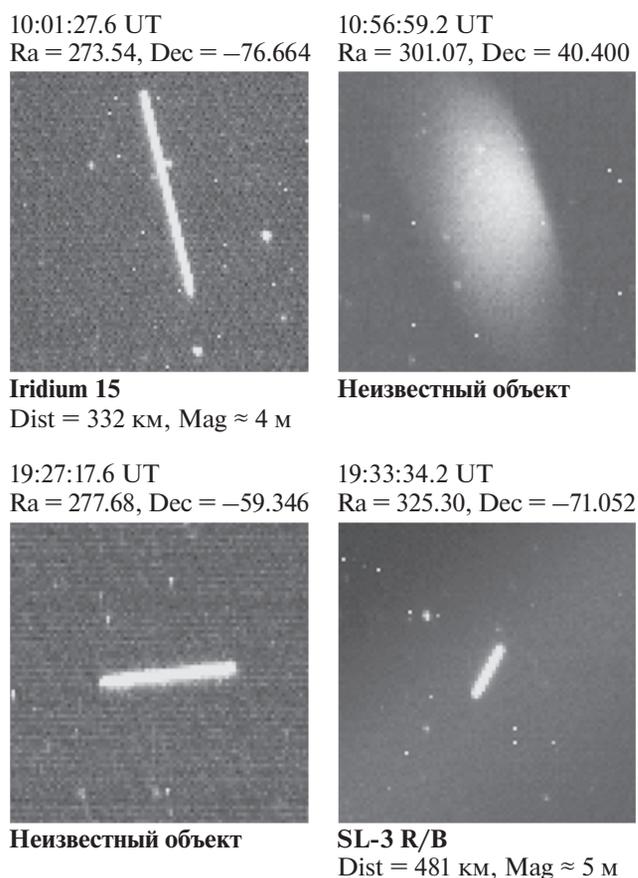


Рис. 4

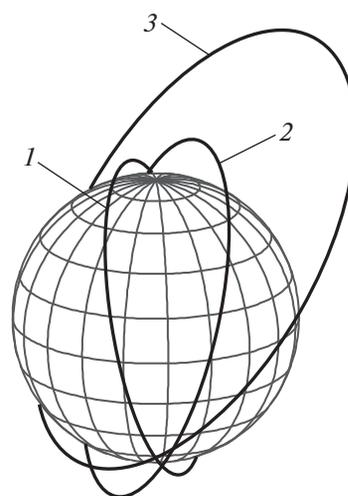


Рис. 5

оптическом диапазоне, комплекс научной аппаратуры для мониторинга в гамма-диапазоне, а также блок сбора информации (БСИ). На каждом из КА № 2 и 3 должна быть установлена аппаратура для мониторинга космической радиации, также, возможно, оптическая камера широкого поля зрения и компактный гамма-спектрометр, и блок

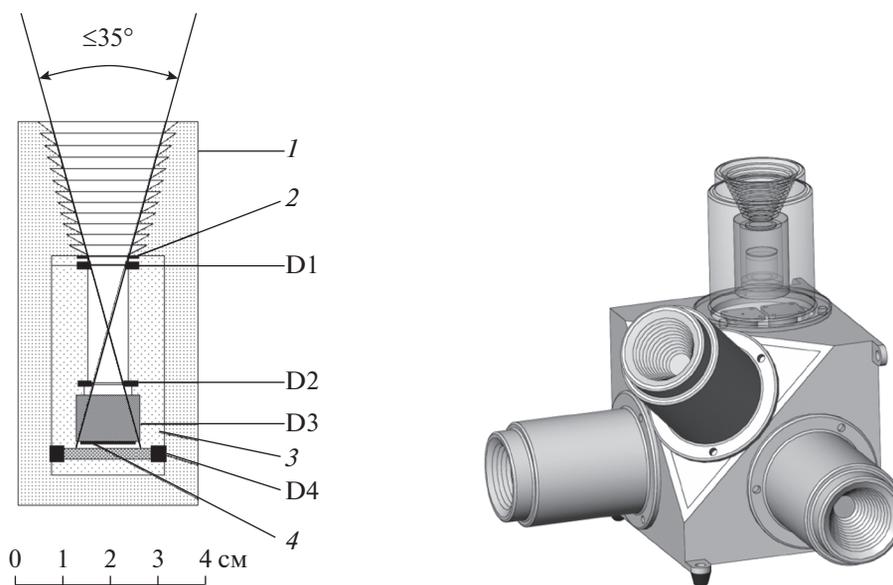


Рис. 6. Слева – структурная схема телескопа СПЭ: 1 – корпус, 2 – фольга ≈ 10 мкм, 3 – изолятор, D1, D2, D4 – полупроводниковые (Si) детекторы, D3 – сцинтилляционный (CsI(Tl)) детектор, 4 – фотодиод. Справа – вариант детекторного блока прибора СПЭ с разнонаправленными телескопами.

электроники, осуществляющий связь с бортовыми системами спутника. В составе научной аппаратуры также должен быть блок сбора информации БСИ, осуществляющий сбор научной и телеметрической информации с отдельных приборов и передачу ее в бортовое запоминающее устройство, подачу на приборы питания и команд, поступающих от бортовых систем спутника.

3.2. Приборы для радиационного мониторинга.

Аппаратура для мониторинга космической радиации должна включать спектрометр (СПЭ) протонов в диапазоне энергий от 1 до >160 МэВ и электронов в диапазоне энергий 0.15–10 МэВ. Его основным элементом является сборка типа “телескоп”, включающая несколько полупроводниковых детекторов различной толщины и сцинтилляционный детектор, расположенные соосно один под другим (рис. 6, левая панель). Для измерения пичч-углового распределения потоков и всенаправленных потоков частиц будет использоваться несколько телескопов с разной пространственной ориентацией. Один из вариантов компоновки прибора показан на рис. 6 (правая панель). Рассматривается также компоновка, при которой оси 4 телескопов должны лежать в плоскости магнитного меридиана (в случае орбиты спутника, близкой к полярной, это означает, что они должны лежать практически в плоскости орбиты), а ось еще одного телескопа – перпендикулярна плоскости магнитного меридиана.

Указанные выше параметры орбит КА на которых должны устанавливаться приборы для радиационного мониторинга, охватывают весь пространственный диапазон существования ра-

диации, захваченной в магнитном поле, т.е. радиационных поясов. При этом должны обеспечиваться измерения всенаправленных потоков захваченных частиц с последующей модельной интерполяцией и экстраполяцией измеренных потоков на всю область радиационных поясов с целью мониторинга космической радиации. Такие измерения позволят рассчитывать текущее распределение потоков частиц в большом объеме радиационных поясов и, как следствие, текущие уровни радиационных нагрузок для большого диапазона эксплуатируемых орбит.

В составе аппаратуры также должен использоваться 3-компонентный магнитометр.

Важным дополнением к системе космического мониторинга станет разработанная в МГУ полностью автоматизированная наземная система оперативного анализа спутниковых данных, предназначенная для оценки и прогнозирования радиационных условий в околоземном космическом пространстве (ОКП) в режиме реального времени.

3.3. Приборы для оптического мониторинга опасных объектов. Комплекс приборов для оптического мониторинга опасных объектов должен состоять из двух широкопольных оптических камер (мини-телескопов) и сканирующего телескопа с диаметром входного окна 120–250 мм и рабочем поле зрения до 100 квадратных градусов. Как было отмечено выше, камеры такого типа успешно используются на спутнике *Ломоносов*. Данные с каждой камеры должны анализироваться процессором, осуществляющим как подробную запись видеоряда (5 кадров в секунду) по триггеру

от гамма-детектора или другого прибора (гамма-всплески), так и выборку видеофрагментов, относящихся к космическим аппаратам, космическому мусору, астероидам и другим объектам. Для успешной реализации наблюдений необходимы средства стабилизации ориентации на время экспозиции (до 3 мин) с точностью не хуже 5" относительно неподвижных звезд и знание ориентации телескопа на момент начала экспозиции не хуже 60'.

Группировка КА Универсат-СОКРАТ должна осуществлять мониторинг режиме, близком к реальному времени. Для этого предполагается задействовать другие КА (например, КА системы *Globalstar* или *Гонец*, или телекоммуникационные спутники на геостационарной орбите). Также предполагается осуществление совместного мониторинга потенциально опасных объектов в космосе – космическим сегментом Универсат-СОКРАТ и наземной сетью роботов-телескопов “МАСТЕР”, развернутой в настоящее время в разных странах [31, 32].

3.4. Приборы для мониторинга электромагнитных транзиентов. Комплекс научной аппаратуры для изучения транзиентных атмосферных явлений (ТАЯ) в УФ и оптическом диапазонах должен включать пространственно-чувствительный спектрометр – малый линзовый телескоп (МЛТ) с высоким временным разрешением для измерения спектра оптического излучения ТАЯ и молний и детекторы УФ и ИК излучения ДУФИК – аналог детекторов на спутниках *Татьяна* и *Вернов* [35, 36] (для сравнения данных нового КЭ с данными предыдущих), дополненный каналами измерений в дальнем УФ диапазоне. Измерение спектра необходимо для определения типа и высоты генерации ТАЯ, а также выделения молниевых разрядов по характерной линии 777 нм и по отсутствию сигнала в области линии поглощения кислорода – 762 нм). Оси приборов МЛТ и ДУФИК должны быть ориентированы в нади́р с углами незатенения 90° вдоль осей детекторов. Прибор МЛТ должен состоять из линзового широкопольного объектива и позиционно-чувствительного детектора в виде мульти-анодного ФЭУ, а также набора фотоумножителей для измерения длинных временных рядов сигнала ТАЯ с высокой чувствительностью и высоким временным разрешением. В конструкции прибора предусмотрено до 16 спектральных каналов.

Прибор ДУФИК должен состоять из трех фотоумножителей, входные окна которых закрыты светофильтрами, обеспечивающими работу в разных спектральных диапазонах – инфракрасном (600–800 нм), ближнем УФ (240–400 нм), солнечно-слепом (100–300 нм). Кроме того, в его состав должен входить оптический детектор на основе микроканальной пластины, обеспечивающий ре-

гистрацию излучения в диапазоне от дальнего УФ до мягкого рентгеновского.

Комплекс научной аппаратуры для мониторинга в гамма-диапазоне должен включать три широконаправленных сцинтилляционных детектора гамма-излучения типа БДРГ [37] для контроля верхней атмосферы и обзора неба в диапазоне 10–3000 кэВ и трековый гамма-спектрометр высокого разрешения и чувствительности. Детекторный узел каждого блока БДРГ выполнен в виде сборки тонкого (0.3 см) сцинтиллятора NaI(Tl) и сцинтиллятора CsI(Tl) большей толщины (1.7 см) цилиндрической формы. Оба сцинтилляционных кристалла имеют одинаковый диаметр 13 см и просматриваются одним фотоумножителем – так называемый “фосвич”. Оси трех гамма-детекторов типа БДРГ должны быть перпендикулярны друг другу и направлены вдоль взаимно перпендикулярных ребер куба, как бы образуя декартову систему координат. При этом главная диагональ куба должны быть ориентирована в нади́р.

Трековый гамма-спектрометр высокого разрешения и чувствительности представляет собой комбинацию позиционно-чувствительного детектора с кодирующей маской. В состав прибора также входит годоскопический узел на основе сцинтилляционных волокон. Ось прибора должна быть ориентирована вдоль оси “нади́р–зенит”, при этом со стороны кодирующей маски прибор должен быть ориентирован в зенит, а со стороны годоскопического узла – в нади́р. Эффективная площадь гамма-спектрометра ~250 см², диапазон энергий 50–5000 кэВ (в режиме кодирования 50–1000 кэВ), угловое разрешение ~2°, поле зрения полного кодирования ±25°. Гамма-телескоп дает возможность проводить проверку появления точечного источника и, таким образом, отделять гамма-всплески различной природы от высыпаний частиц. Аппаратура также включает блок анализа данных, содержащий узлы цифровой электроники, позволяющие вести запись показаний с высоким временным разрешением (до 10 мкс), проводить оперативный анализ изображений с телескопа с кодирующей маской, а также вырабатывать триггер гамма-всплеска.

3.5. Наземный комплекс управления. В ходе осуществления космического эксперимента предполагается создание наземного комплекса, предназначенного для решения задач управления КА, а также приема и обработки целевой научной информации. Он будет создан на базе наземного научного комплекса КА *Ломоносов*, который предназначен для планирования целевого применения комплекса научной аппаратуры: приема, обработки, архивации и распространения информации с КА. Созданный наземный комплекс представляет собой задел, который будет использован при реализации нового проекта МГУ Уни-

версат-СОКРАТ, что существенно уменьшит расходы на реализацию проекта. Это позволит избежать затрат, связанных с разработкой основных видов обеспечения полета КА: командно-программного, информационно-телеметрического и навигационно-баллистического.

Наряду с системой приема и обработки космической научной телеметрии в МГУ создана система оперативного анализа и прогнозирования радиационных условий в ОКП, основанная на автоматизированном анализе данных космического мониторинга с использованием операционных моделей внешних воздействующих факторов космической среды [38]. Их использование позволит повысить эффективность создаваемой космической системы Универсат-СОКРАТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Как следует из вышеизложенного, электромагнитные транзиенты являются одним из потенциально опасных факторов в околоземном пространстве и верхней атмосфере Земли. Энергию вспышки можно оценить, например, из данных по УФ излучению ТАЯ, полученному на спутниках МГУ, в предположении, что количество УФ фотонов пропорционально энергии ионизации: $Q_a = E_{\text{ion}}/K(H) \times \epsilon$, где Q_a — количество УФ фотонов, E_{ion} — энергия ионизации, $K(H)$ — коэффициент пропорциональности, ϵ — энергия одного фотона, 3,5 эВ. Коэффициент пропорциональности зависит от высоты и для высот порядка 50 км равен 10^3 [39].

Из полученного экспериментального распределения ТАЯ по числу фотонов [40], эта величина лежит в диапазоне 10^{23} – 10^{25} фотонов, что дает среднюю энергию на одно событие порядка 100 МДж. Нижняя оценка энерговыделения ТАЯ, сделанная в эксперименте ISUAL составляет 700 МДж/мин. Если сравнить плотность энергии ($\text{Вт}/\text{м}^2$) выделяемую за счет ТАЯ атмосфере с другими световыми процессами, например, полярными сияниями, то она окажется на два порядка выше (хотя и на малом временном масштабе), что говорит о важности этих процессов для состояния верхней атмосферы. Более того, частота и интенсивность высотных атмосферных транзиентов может быть откликом на внешнее воздействие — т.е. индикатором космической погоды.

Электромагнитные транзиенты могут быть также источниками радиационной опасности. Во время развития ТАЯ происходит ускорение электронов до высоких энергий (убегающие электроны). Такие электроны имеют релятивистские энергии, достигающие нескольких МэВ, и дозовые эффекты от такого излучения являются потенциально опасным фактором для электронных систем. Оценки эффективных доз облучения и

влияние дозы от убегающих электронов на ткани человеческого тела для высот полета самолетов были сделаны в [41]. Было показано, что значение дозы в одиночном событии, полученное в этих оценках, не является опасным для человека. В то же время, оценка величины дозы может измениться при учете пространственной структуры разряда. Этот фактор имеет особое значение на ранних стадиях развития электрического разряда, пока его область сильно локализована. Необходимо принять во внимание и тот факт, что ТАЯ часто образуются сериями (несколько событий следуют подряд за короткий интервал времени), что также может вызвать увеличение дозового эффекта.

Другим источником радиационной опасности для космических аппаратов и самолетов могут быть нейтроны, генерируемые как вторичный компонент ТАЯ (см. [42, 43]). Нейтроны генерируются в фотоядерных взаимодействиях, когда энергия фотонов выше порога фотоядерной реакции (около нескольких МэВ). Фотоны (гамма-кванты) такой высокой энергии регистрируются в атмосфере и эти явления получили название TGF (Terrestrial Gamma-ray Flashes — наземные гамма вспышки). Количество TGF с суммарной энергией гамма-квантов больше 1 кДж оценивается в литературе как 10^{-5} км² в час, при этом, ожидаемое количество нейтронов в событии около 10^{12} (или поток нейтронов) от объекта размерами 10×10 км $\approx 10^4$ нейтрон/м². Этот поток нейтронов на порядок больше того, что производится в обычной атмосфере за счет прохождения космических лучей, при этом не учтены еще низкоэнергичные нейтроны, которые обеспечивают основной радиационный эффект. В работе [43] проведена оценка дозы от TGF, которая составила 10^{-4} вблизи источника и спадает до 10^{-10} на высоте 50 км. Важно отметить, что в случае потока нейтронов защиты от радиации работают не так эффективно, как в случае потоков заряженных частиц (электронов).

Основываясь на результатах наблюдений потенциально опасных космических явлений на спутнике *Ломоносов*, включая исследования электромагнитных транзиентов предложен новый проект Универсат-СОКРАТ, в ходе реализации которого должны быть решены следующие задачи: оперативная (в реальном времени) оценка радиационных условий в околоземном космическом пространстве для оценки радиационных рисков выполнения космических миссий и выработки алертных сигналов для принятия решений по их управлению; верификация современных расчетных моделей полет радиации околоземного космического пространства; оперативный контроль потенциально опасных объектов естественного и техногенного происхождения в околоземном пространстве; контроль электромагнитных транзиентов в верхней

атмосфере Земли и космическом пространстве (гамма-всплески, солнечные вспышки).

Успешная реализация проекта позволит: впервые в мире создать прообраз космической системы мониторинга и предотвращения космических угроз как для осуществляемых, так и планируемых космических миссий, включая высотные атмосферные летательные аппараты; создать новые инновационные технологии в области приборостроения и методы решения информационные задачи в реальном масштабе времени; разработать новые образовательные стандарты и методы подготовки специалистов в новой сфере прикладных космических исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России по результатам исследований в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы” (уникальный идентификатор № RFMEFI60717X0175).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sadovnichii V.A., Panasyuk M.I., Amelushkin A.M. et al.* Lomonosov satellite – space observatory to study extreme phenomena in space // *Space Sci. Rev.* 2017. V. 212. № 3–4. P. 1705–1738.
2. *Садовничий В.А., Амелюшкин А.М., Ангелоплос В. и др.* Космические эксперименты на борту спутника МГУ “Ломоносов” // *Космич. исслед.* 2013. Т. 51. № 6. С. 470–477 (*Cosmic Research*. P. 427–433).
3. *Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др.* Эксперимент на спутнике *Вернов*: транзитные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч. I. Описание эксперимента // *Космич. исслед.* 2016. Т. 54. № 4. С. 277–285 (*Cosmic Research*. P. 261–269).
4. *Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др.* Эксперимент на спутнике *Вернов*: транзитные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч. II. Первые результаты // *Космич. исслед.* 2016. Т. 54. № 5. С. 369–376 (*Cosmic Research*. P. 343–350).
5. *Садовничий В.А., Панасюк М.И., Яшин И.В. и др.* Исследование космической среды на микроспутниках “Университетский-Татьяна” и “Университетский-Татьяна-2” // *Астрономический вестник.* 2011. Т. 45. № 1. С. 5–31.
6. *Mullen E.G., Gussenhoven M.S., Ray K., Violet M.A.* A double-peaked inner radiation belt: cause and effect as seen on CRRES // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1991. V. 38. P. 1713–1718.
7. *Мягкова И.Н., Богомолов А.В., Шугай Ю.С.* Динамика потоков релятивистских электронов в околоземном космическом пространстве в 2001–2005 гг. // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия.* 2010. № 3. С. 77–80.
8. *Тверская Л.В., Балаиов С.В., Веденькин Н.Н. и др.* Внешний радиационный пояс релятивистских электронов в минимуме 23 цикла солнечной активности // *Геомагнетизм и Аэрономия.* 2012. Т. 52. № 6. С. 779–784.
9. *Harris A.* The population of near-Earth asteroids // *Icarus.* 2015. V. 257. P. 302–312.
10. *Mainzer A., Bauer J., Grav T., Masiero J.* The population of tiny near-Earth objects observed by NEOWISE // *Astrophysical J.* 2014. V. 784. № 2. P. 110.
11. *Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R.A.* Run-away electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // *Phys. Lett. A.* 1992. V. 165. № 5–6. P. 463–468.
12. *Mareev E.A., Evtushenko A.A., Yashunin S.A.* On the modelling of sprites and sprite-producing clouds in the global electric circuit // *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges* / Ed. Füllekrug M. et al. Springer, Netherlands. 2006. P. 313–340.
13. *Milikh G.M., Valdivia J.A., Papadopoulos K.* Spectrum of red sprites // *J. Atm. Terr. Phys.* 1998. V. 60. № 7–9. P. 907–915.
14. *Surkov V.V., Hayakawa M.* Underlying mechanisms of transient luminous events: a review // *Ann. Geophys.* 2012. V. 30. № 8. P. 1185–1212.
15. *Fishman G.J., Bhat P.N., Mallozzi R. et al.* Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin // *Science.* 1994. V. 264. № 5163. P. 1313–1316.
16. *Dwyer J.R., Smith D.M., Cummer S.A.* High-energy atmospheric physics: terrestrial gamma-ray flashes and related phenomena // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 173. № 1–4. P. 133–196.
17. *Dwyer J.R.* The relativistic feedback discharge model of terrestrial gamma ray flashes // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. № A2. P. A02308.
18. *Garipov G., Grigoriev A., Khrenov B et al.* High energy transient luminous atmospheric phenomena: the potential danger for suborbital flights // *Extreme Events in Geospace* / Ed. Buzulukova N. Elsevier. 2017.
19. *Bhat P.N., Meegan C.A., von Kienlin A. et al.* The 3rd Fermi GBM gamma-ray burst catalog: the first six years // *The Astrophysical J. Supplement Series.* V. 223. № 2. P. 28.
20. *Radioactive space debris: what goes up, must come down* // *WISE/NIRS Nuclear Monitor.* Issue 629. 10/06/2005.
21. *Аникеева М.А., Боярчук К.А., Улин С.Е.* Обнаружение радиоактивного космического мусора с борта космического аппарата // *Вопросы электромеханики.* 2012. Т. 126. № 1. С. 13–18.
22. *Klimov P.A., Panasyuk M.I., Khrenov B.A. et al.* The TUS detector of extreme energy cosmic rays on board the Lomonosov satellite // *Space Sci. Rev.* 2017. V. 212. № 3–4. P. 1687–1703.
23. *Svertilov S.I., Panasyuk M.I., Bogomolov V.V. et al.* Wide-Field gamma-spectrometer BDRG: GRB monitor on-board the Lomonosov mission // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. P. 8.

24. *Lipunov V.M., Gorbovskoy E.S., Kornilov V.G. et al.* SHOK – the first russian wide-field optical camera in space // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. P. 6.
25. *Park I.H., Panasyuk M.I., Reglero V. et al.* UFFO/Lomonosov: The payload for the observation of early photons from gamma ray bursts // *Space Sci. Rev.*
26. *Adams J.H. and the JEM-EUSO collaboration.* Space experiment TUS on board the Lomonosov satellite as pathfinder of JEM-EUSO // *Experimental Astronomy.* 2015. V. 40. № 1. P. 315–326.
27. *Khrenov B.A., Klimov P.A., Panasyuk M.I. et al.* First results from the TUS orbital detector in the extensive air shower mode // *J. Cosmology and Astroparticle Physics.* 2017. V. 2017. P. JCAP09(2017)006.
28. *Khrenov B.A., Stulov V.P.* Detection of meteors and sub-relativistic dust grains by the fluorescence detectors of ultra high energy cosmic rays // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. № 10. P. 1868–1875.
29. *Adams J.H., Ahmad S., Albert J.N. et al.* JEM-EUSO: Meteor and nuclearite observations // *Experimental Astronomy.* 2015. V. 40. № 1. P. 253–279.
30. *Abdellaoui G., Abe S., Acheli A. et al.* Meteor studies in the framework of the JEM-EUSO program // *Planetary and Space Science.* 2017. V. 143. P. 245–255.
31. *Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E. et al.* Master Robotic Net // *Advances in Astronomy.* 2010. Article id. 349171.
32. *Kornilov V., Lipunov V., Gorbovskoy E. et al.* Robotic optical telescopes global network MASTER II. Equipment, structure, algorithms // *Experimental Astronomy.* 2012. V. 33. № 1. P. 173–196.
33. *Панасюк М.И., Подзолко М.В., Ковтюх А.С. и др.* Оперативный радиационный мониторинг в околоземном космическом пространстве на базе многояркой группировки малых космических аппаратов // *Космич. исслед.* 2015. Т. 53. № 6. С. 461–468 (*Cosmic Research.* P. 423–429).
34. *Панасюк М.И., Подзолко М.В., Ковтюх А.С. и др.* Оптимизация измерений потоков частиц радиационных поясов Земли // *Космич. исслед.* 2017. Т. 55. № 2. С. 85–93 (*Cosmic Research.* P. 79–87).
35. *Garipov G.K., Panasyuk M.I., Rubinshtein I.A. et al.* Ultraviolet radiation detector of the MSU research educational microsatellite *Universitetskii-Tat'yana* // *Instrum. Exp. Tech.* 2006. V. 49. № 1. P. 126–131.
36. *Panasyuk M.I., Sverilov S.I., Bogomolov V.V. et al.* RELEC mission: Relativistic electron precipitation and TLE study on-board small spacecraft // *Adv. Space Res.* 2016. V. 57. № 3. P. 835–849.
37. *Амелюшкин А.М., Галкин В.И., Гончаров Б.В. и др.* Приборы БДРГ и ШОК для исследования собственного излучения гамма-всплесков на борту космического аппарата “Ломоносов” // *Космич. исслед.* 2013. Т. 51. № 6. С. 478–483 (*Cosmic Research.* P. 434–438).
38. *Калегаев В.В., Бобровников С.Ю., Кузнецов Н.В. и др.* Центр оперативного космического мониторинга НИИЯФ МГУ. Прикладные аспекты гелиогеофизики // *Материалы специальной секции “Практические аспекты науки космической погоды” 11-й ежегодной конференции “Физика плазмы в солнечной системе”.* М.: ИКИ РАН. 2016. С. 146–159.
39. *Беляев В.А., Чудаков А.Е.* Ионизационное свечение воздуха и возможность его использования для регистрации широких атмосферных ливней // *Известия АН СССР. Серия физическая.* 1966. Т. 30. № 10. С. 1700–1707.
40. *Klimov P.A., Garipov G.K., Khrenov B.A. et al.* Vernov satellite data of transient atmospheric events // *J. Applied Meteorology and Climatology.* 2017. V. 56. № 8. P. 2189–2201.
41. *Dwyer J.R., Smith D.M., Uman M.A. et al.* Estimation of the fluence of high-energy electron bursts produced by thunderclouds and the resulting radiation doses received in aircraft // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. № D9. P. D09206.
42. *Tavani M., Marisaldi M., Labanti C. et al.* Terrestrial gamma-ray flashes as powerful particle accelerators // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 106. № 1. P. 018501.
43. *Drozdov A., Grigoriev A., Malyshkin Y.* Assessment of thunderstorm neutron radiation environment at altitudes of aviation flights // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. № 2. P. 947–955.