

# СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

УДК 551.5

## НАУЧНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ «ЛОМОНОСОВ»

Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов,  
Р. С. Салихов, В. П. Ходненко

*Космический аппарат (КА) «Михайло Ломоносов» является международным проектом, в реализации которого принимают участие учёные, аспиранты и студенты из Южной Кореи, Испании, Канады, США, Польши, Германии, Дании, Норвегии, Италии. Он создан в соответствии с поручением Правительства России от 31.08.2010 г. № СИ-П7-5987 на базе космической платформы «Канопус-В» разработки АО «Корпорация «ВНИИЭМ». На данной платформе были разработаны и успешно запущены в 2012 г. КА «Канопус-В» № 1 и Белорусский космический аппарат. Работы по проекту «Ломоносов» ведутся по Госконтракту с МГУ, и посвящён он памяти великого русского учёного Михайло Ломоносова, основателя МГУ. Головным предприятием по созданию КА «Ломоносов» является АО «Корпорация «ВНИИЭМ». Основной разработчик комплекса научной аппаратуры – НИИЯФ МГУ им. М. В. Ломоносова. КА «Ломоносов» выводится на орбиту ракетой-носителем «Союз-2» этапа 1а с блоком выведения «Волга» с космодрома Восточный. В статье рассматривается назначение и научные задачи, решаемые КА «Ломоносов». Приведены основные характеристики КА, состав, назначение и характеристики научной аппаратуры.*

***Ключевые слова:** космический аппарат, космические лучи, энергетический спектр, космические гамма-всплески, верхняя атмосфера, оптический диапазон, гамма-диапазон, транзиентные световые явления, заряженные частицы, космические лучи, радиационные пояса.*

Целью создания КА «Ломоносов» являлось исследование космических лучей предельно высоких энергий и быстропротекающих процессов в оптическом, рентгеновском и гамма-диапазонах длин волн, проходящих в верхних слоях атмосферы Земли и во Вселенной.

Этот спутник стал уже четвёртым, разработанным для МГУ космическим аппаратом. В частности, первый спутник под названием «Университетский – Татьяна-1» был запущен в космос в 2005 г. в рамках мероприятий, посвящённых 250-летию столичного вуза. В дальнейшем на земную орбиту были выведены КА «Университетский – Татьяна-2» и «Михайло Ломоносов-1».

### Научные задачи и назначение КА

КА «Михайло Ломоносов», в отличие от предшествующих проектов, имеет более широкий спектр научных задач.

На нём устанавливаются семь детекторов для изучения экстремальных физических явлений в земной атмосфере, околоземном космическом пространстве (ОКП) и во Вселенной.

С их помощью предполагается исследовать космические лучи, т. е. заряженные частицы солнечного, галактического и внегалактического происхождения с гигантским зарядом энергии.

До сих пор астрофизикам неизвестно, что порождает частицы столь высокой энергии. На это не способны ни взрывы сверхновых, ни выбросы вещества чёрными дырами.

Известно, что атмосфера Земли представляет собой мишень для различных видов космических излучений.

Частицы высоких энергий рождают в атмосфере каскады вторичных частиц – широкие атмосферные ливни (ШАЛ), регистрируя которые, можно судить о параметрах самих первичных частиц.

Однако во Вселенной существуют не только заряженные частицы. Гамма-излучения Вселенной, и в первую очередь, наиболее энергичные явления – гамма-всплески, сопровождающие вспышки сверхновых звёзд и представляющие собой объект пристального внимания исследователей в наши дни. Гамма-всплески тоже создают свой «отклик» в атмосфере в виде черенковского излучения.

Наблюдения за гамма-всплесками помогут проследить эволюцию Вселенной. До сих пор природа этого явления до конца непонятна. Долгое время эти явления наблюдались и изучались только в гамма-диапазоне. Но в последние годы появились средства, позволяющие их наблюдать в оптическом диапазоне. Особенность наблюдения на КА «Михайло Ломоносов» заключается в том, что здесь ожидается одновременное наблюдение собственного излучения гамма-всплесков в оптическом и гамма-диапазонах.

Следует также иметь в виду, что радиационные пояса Земли – заряженные частицы, захваченные магнитным полем, могут исчезать, высыпаться из магнитной ловушки в атмосферу Земли, создавая в ней обширные области ионизации.

Энергия частиц радиационных поясов достаточно велика, например, в ней присутствуют релятивистские электроны с энергиями в несколько МэВ, которые могут проникнуть достаточно глубоко в атмосферу и по скорости ионизации вполне конкурировать с ШАЛ космических лучей.



Рис. 1. Общий вид КА «Ломоносов»

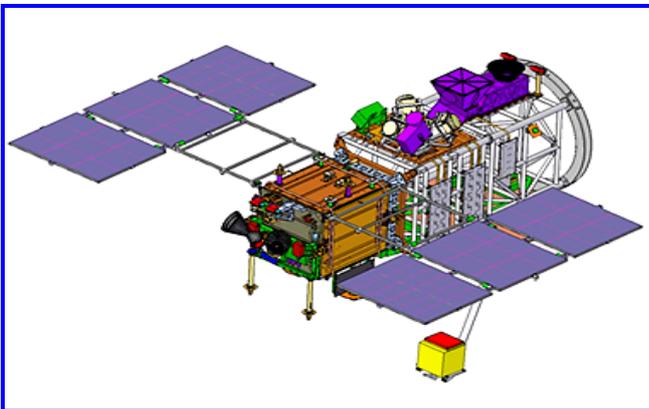


Рис. 2. КА «Ломоносов» в условиях орбитального полёта

Однако, кроме космических факторов, на атмосферу также оказывают влияние физические процессы, происходящие совсем близко от поверхности Земли. Недавно открытые «транзиентные световые явления» и «земные гамма-всплески», природа которых возможно связана с проявлениями атмосферного электричества, – яркий тому пример.

Исследование описанных выше явлений – основная задача космического аппарата «Михайло Ломоносов».

Кроме того, на борту спутника будут выполняться актуальные прикладные исследования потенциально опасных явлений в атмосфере Земли, а именно исследование высотных взрывов в атмосфере в ультрафиолетовом диапазоне, а также апробация комплекса космического автоматического слежения за малыми небесными телами, астероидами и космическим мусором, осуществляться эксперименты по оптимизации бортовой навигационной системы.

Таким образом, КА «Михайло Ломоносов» предназначен для исследования экстремальных физических явлений в атмосфере Земли, ближнем космосе и во Вселенной:

- космических лучей предельно высоких энергий  $10^{19} - 10^{20}$  эВ в районе обрезания энергетического спектра («ГЗК-обрезание»);
  - космических гамма-всплесков – наиболее энергичных процессов во Вселенной одновременно в оптическом и гамма-диапазонах;
  - транзиентных световых явлений (ТСЯ) в верхней атмосфере Земли, начатых в предыдущих космических проектах МГУ «Университетский – Татьяна» и «Университетский – Татьяна -2» [1];
  - магнитосферных частиц в рентгеновском и оптическом диапазонах – возможных источников транзиентных и квазистационарных явлений в верхней атмосфере;
  - фундаментальных космологических явлений;
  - мониторинга радиационной обстановки и исследования радиационных поясов Земли;
  - мониторинга опасных объектов в околоземном космическом пространстве совместно с сетью наземных роботизированных телескопов «Мастер».
- Общий вид КА «Ломоносов» в МИКе представлен на рис. 1, а спутник в орбитальной конфигурации – на рис. 2.

Основные характеристики КА «Ломоносов» приведены в табл. 1.

### Структура и конструкция КА

В основу построения КА «Ломоносов» [1] положен модульный принцип. В соответствии с ним КА состоит из двух основных частей (модулей):

- служебной платформы, за основу которой взята служебная платформа КА «Канопус-В» [2];
- комплекса научной аппаратуры (КНА), который разработан НИИЯФ МГУ, и конструктивно объединён в модуль научной аппаратуры (МНА) соисполнителем АО «НИИЭМ».

Структурная схема КА «Ломоносов» представлена на рис. 3.

Таблица 1

**Основные характеристики КА**

Параметры номинальной орбиты	
Тип орбиты	Околокруговая, солнечно-синхронная
Высота в восходящем узле (ВУЗ)	485 км
Наклонение	97,272 град.
Эксцентриситет	0
Драконический период обращения	94,2356 мин
Местное среднее солнечное время ВУЗ	11 ч 15 мин
Основные технические характеристики	
Ракета-носитель	«Союз-2» (этап 1а) с БВ «Волга»
Космодром	Восточный
Масса КА	~645 кг
Масса комплекса научной аппаратуры	~160 кг (без кабельной сети и РЛЦИ)
Среднесуточная мощность системы электроснабжения	380 Вт (600 Вт на время не более 10 мин)
Средневытяговое энергопотребление служебной платформы КА	197 Вт
Краткосрочное энергопотребление КА в режиме НП (на время не более 10 мин)	440 Вт
Энергопотребление служебной платформы (постоянно)	170 Вт
Энергопотребление комплекса научной аппаратуры (КНА)	181 Вт в тени, 143 Вт на освещённом участке
Точность ориентации (по 3 осям)	5 угл. мин
Точность стабилизации (по 3 осям)	0,001 град./с
Радиолиния целевой информации	8,2 ГГц, скорость 61,44 Мбит/с, объём не менее 3 Гбайт/сеанс. Кол-во сеансов – 4 в сутки на освещённом участке орбиты
Телекомандная система	S-диапазон, КИП: Москва, г. Железногорск
Объём ЗУ КНА	2 Тбайт
Управление КНА	Разовыми командами и по МКО
Срок активного существования	3 года
Оперативность передачи целевой информации на Землю	

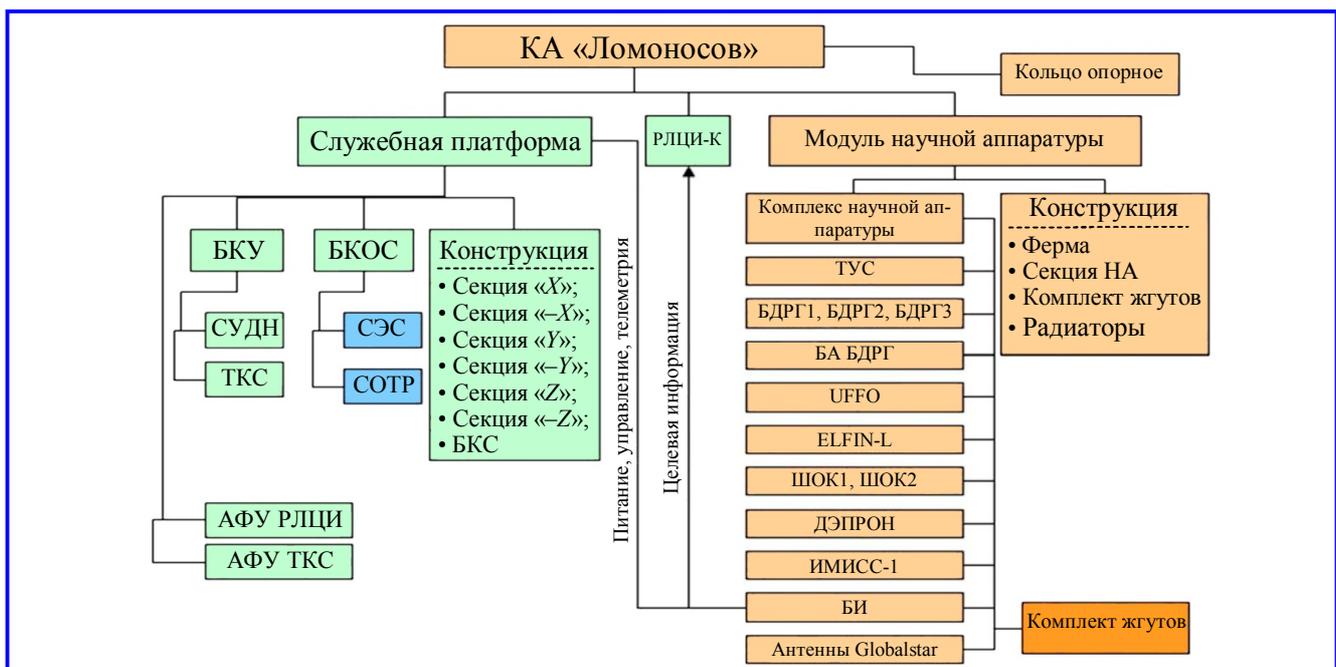


Рис. 3. Структурная схема КА «Ломоносов»

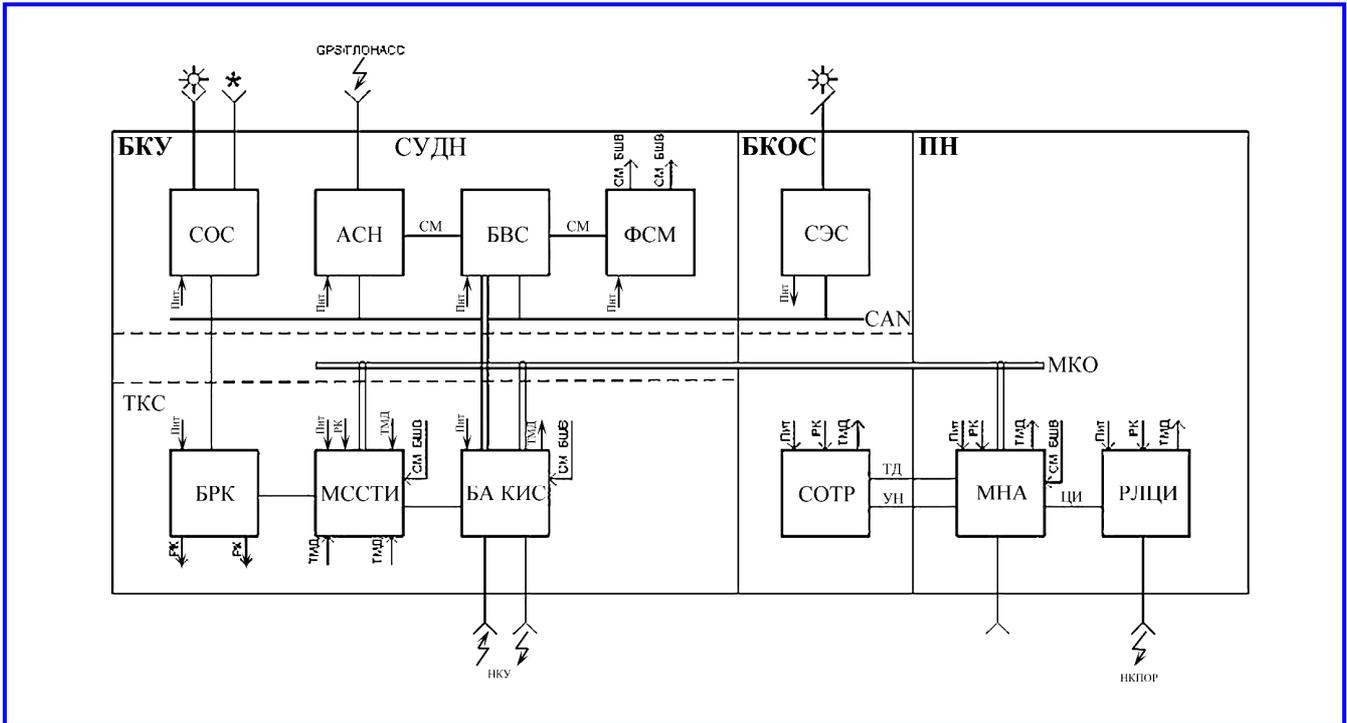


Рис. 4. Функциональная схема КА «Ломоносов»

Функциональная схема КА «Ломоносов» приведена на рис. 4 и условно состоит из двух составных частей:

- 1) бортового комплекса управления (БКУ) и бортового комплекса обеспечивающих систем (БКОС), которые образуют служебную платформу КА;
- 2) комплекса научной аппаратуры и РЛЦИ.

Электрическое сопряжение (взаимодействие) служебной платформы и КНА осуществляется входящим в состав КНА блоком информации.

На рис. 4 используются следующие обозначения:

- СОС – система ориентации и стабилизации;
- АСН – аппаратура спутниковой навигации;
- БВС – бортовая вычислительная система;
- ФСМ – формирователь секундных меток;
- МССТИ – многозональная система сбора телеметрической информации;
- БРК – блок разовых команд;
- БА КИС – бортовая аппаратура командно-измерительной системы;
- МКО – мультиплексный канал обмена.

БКОС выполняет функции по обеспечению работоспособности бортовой аппаратуры КА. В состав БКОС входят:

- система энергоснабжения (СЭС);
- система обеспечения теплового режима (СОТР).

БКУ предназначен для управления бортовой аппаратурой КА, в том числе НА и радиолинией передачи целевой информации (РЛЦИ-К), на всех этапах наземных испытаний, стартовой подготов-

ки, штатной эксплуатации на орбите во взаимодействии с НКУ и в автономном полёте КА.

В состав БКУ входят:

- бортовая вычислительная система (БВС);
- телекомандная система (ТКС) S-диапазона;
- система ориентации и стабилизации (СОС);
- аппаратура спутниковой навигации (АСН) и формирователи секундных меток (ФСМ);
- основные независимые дублированные шины данных – МКО, CAN.

Интеграция систем, входящих в БКУ, в единый управляющий комплекс осуществляется средствами программного обеспечения БКУ (ПО БКУ).

Контроль и управление системами, входящими в БКУ, осуществляются БВС с установленным на ней программным обеспечением (ПО БВС). Отдельные компоненты СОС и АСН имеют встроенное ПО для выполнения определённых задач.

Система ТКС также имеет специальное ПО для выполнения своего функционального назначения.

### Служебная платформа

Служебная платформа КА «Ломоносов» предназначена для выполнения целевых функций КА в течение всего периода эксплуатации.

В состав служебной платформы входят:

- бортовой комплекс обеспечивающих систем (БКОС);
- бортовой комплекс управления (БКУ).

Космический аппарат, как упоминалось ранее, конструктивно состоит из служебной платформы и модуля научной аппаратуры.

МНА состоит из фермы, в верхней части которой (в сторону зенита) на двух теплоотводящих планках установлены блок информации (БИ), антенны Globalstar и научная аппаратура, за исключением трековой установки (ТУС), которая размещена на отдельной сварной раме нижней части фермы (со стороны надира).

Система обеспечения теплового режима (СОТР) содержит тепловые трубы, радиаторы, кожухи с термобуферами, нагреватели, датчики температуры, маты ЭВТИ.

Радиаторы СОТР, обеспечивающие тепловой режим блоков МНА (за исключением прибора ТУС), расположены на теневой стороне КА, со стороны «+Y».

Ферма МНА представляет собой жёсткую сварную конструкцию из дюралюминиевых труб, обеспечивающих взаимную механическую привязку визирных осей научной аппаратуры и устойчивость к механическим нагрузкам ракеты-носителя.

Компоновка приборов на модуле научной аппаратуры представлена на рис. 5.

Плиты, на которые крепятся блоки КНА, выполнены из алюминиевого сплава. Для обеспечения полей обзора блоков КНА, их крепление к плите секции научной аппаратуры (НА) (см. рис. 5) осуществляется с помощью специальных кронштейнов, в которых установлены тепловые трубы, обеспечивающие передачу тепла от посадочных мест блоков до плиты секции НА.

Приборы UFFO и Globalstar смонтированы на отдельной плите, как показано на рис. 5.

Деление КА на модуль научной аппаратуры и служебную платформу позволило существенно сократить объём наземной экспериментальной отработки в части СОТР и механических испытаний.

В целом, в основу служебной платформы (рис. 6) положен негерметичный корпус, являющийся силовой конструкцией. Он выполнен в виде параллелепипеда с основанием  $750 \times 750$  мм и высотой 900 мм.

Грани параллелепипеда выполнены из трёхслойных сотовых панелей со встроенными тепловыми трубами, толщина несущих листов из алюминиевого сплава составляет 0,5 мм, толщина сотовой панели – 18 мм. По периметру каждой сотовой панели располагается каркас из алюминиевого сплава.

Солнечные батареи заимствованы из состава КА «Канопус-В».

Связь служебной платформы с МНА осуществляется через термоизолированные узлы крепления с помощью переходного кольца.

Стыковка КА «Ломоносов» с блоком выведения (БВ) «Волга» осуществляется с помощью кольца опорного, которое крепится к ферме МНА.

Отделение КА проводится соответствующей системой отделения, которая также входит в состав БВ «Волга».

После отделения от БВ космический аппарат «Ломоносов» начинает функционировать, проводятся предусмотренные программой лётных испытаний тесты, и по их окончании КА приобретает лётную конфигурацию (рис. 2).

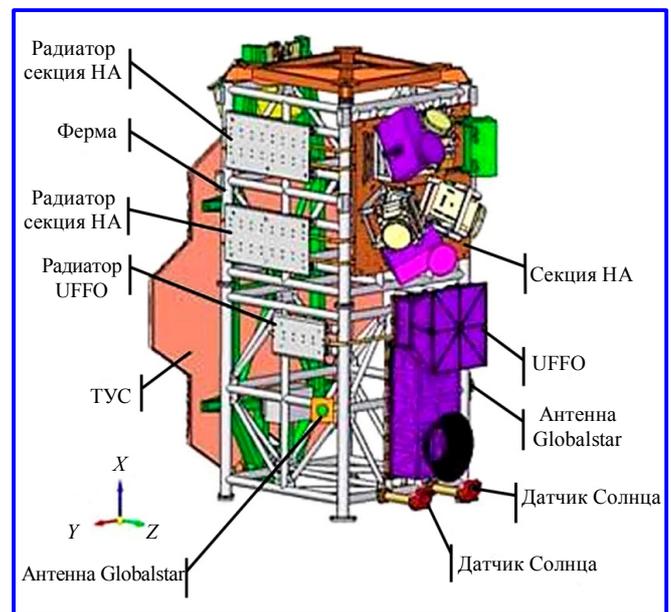


Рис. 5. Компоновка научной аппаратуры на ферме МНА

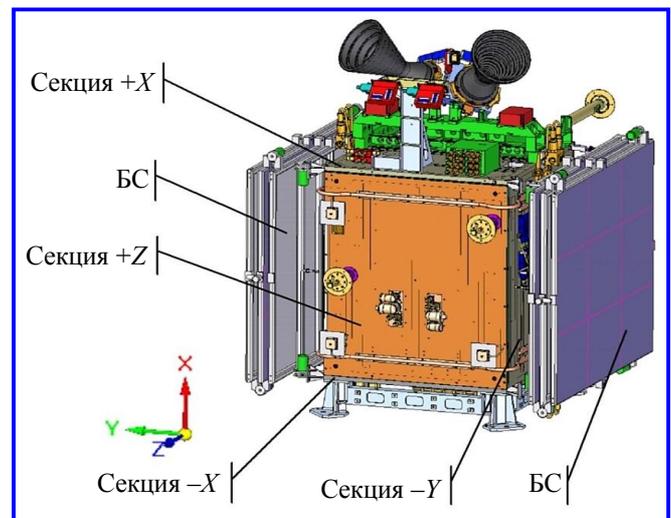


Рис. 6. Общий вид служебной платформы КА «Ломоносов»

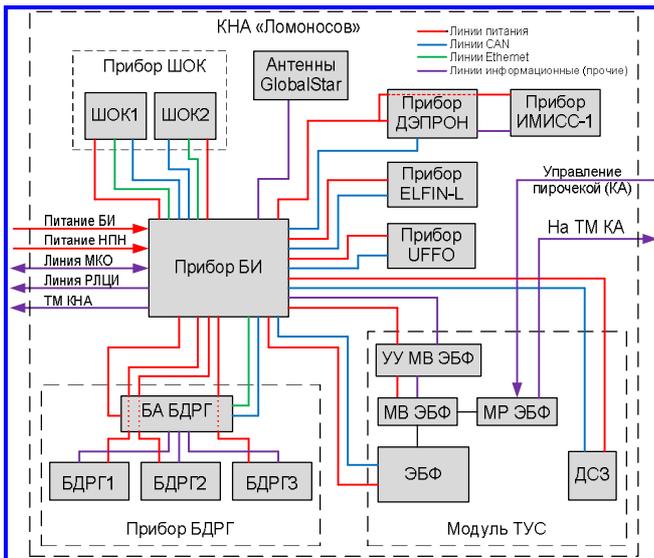


Рис. 7. Структурная схема КНА «Ломоносов»

### Комплекс целевой аппаратуры

Комплекс целевой аппаратуры включает:  
 – модуль научной аппаратуры, состоящий из КНА и конструкции;  
 – радиолинию целевой информации – РЛЦИ-К (расположена на служебной платформе).

Структурная схема КНА «Ломоносов» представлена на рис. 7, а состав и характеристики приведены в табл. 2.

### Назначение КНА

Комплекс ТУС (трековая установка) представлен на рис. 8.

Орбитальный детектор ТУС (трековая установка) предназначен для наблюдения вспышек ультрафиолетового (УФ) излучения с длиной волны 300 – 400 нм в ночной атмосфере Земли, пространственно локализованных в виде отрезка

Таблица 2

### Состав и характеристики КНА

Наименование аппаратуры	Характеристики, регистрируемое излучение	Разработчик
Комплекс ТУС (трековая установка)	Наблюдение вспышек УФ (300 – 400 нм) излучения в атмосфере Земли	НИИЯФ МГУ
БДРГ – блок детектора рентгеновского и гамма-излучения (БДРГ1, БДРГ2, БДРГ3 – детектирующие блоки, БА БДРГ – блок анализа)	Рентгеновское и гамма-излучение интенсивностью 20000 фотонов/с в диапазоне энергий от 0,01 до 3 МэВ. Потоки электронов интенсивностью $2^{16}$ частиц/с в диапазоне энергий от 0,3 до 10,0 МэВ	НИИЯФ МГУ
Широкоапертурная камера ШОК (ШОК1 и ШОК2)	Мониторинговое фотографирование в оптическом диапазоне верхней полусферы КА со скоростью 5 кадров в секунду	НИИЯФ МГУ
UFFO (UBAT – рентгеновский телескоп с кодовой маской, SMT – УФ-телескоп с поворотным зеркалом)	Рентген и гамма-излучение от 5 до 200 кэВ УФ- и оптический диапазон от 200 до 650 нм	НИИЯФ МГУ EWha Woman's University of Seoul (Республика Корея)
ДЭПРОН – дозиметр электронов, протонов, нейтронов	Измерение поглощённых доз и спектров линейной передачи энергии от высокоэнергичных электронов, протонов и ядер космического излучения. Регистрация потоков тепловых и медленных нейтронов	НИИЯФ МГУ
ИМИСС-1 – микромеханический инерциальный измерительный модуль	Регистрация ускорений в пределах от 0,001 до 18 g по трём координатным осям	НИИ механики МГУ
ELFIN – L – магнитометр, детектор энергичных электронов, детектор энергичных протонов и ионов	Одновременное измерение вариаций потоков заряженных частиц радиационных поясов Земли и регистрация флуктуаций магнитного поля. Электроны от 0,05 до 4,7 МэВ, протоны и ионы от 0,05 до 0,5 МэВ, динамический диапазон магнитометра $\pm 74000$ нТл	НИИЯФ МГУ Институт геофизики и планетарной физики Калифорнийского университета (США)
<b>Служебная система КНА</b>		
БИ-блок информации	Управление и контроль КНА. Распределение питания, сбор, обработка и хранение научной и ТМ-информации. Взаимодействие с БКУ. Передача информации в РЛЦИ со скоростью 61,44 Мбит/с	НИИЯФ МГУ

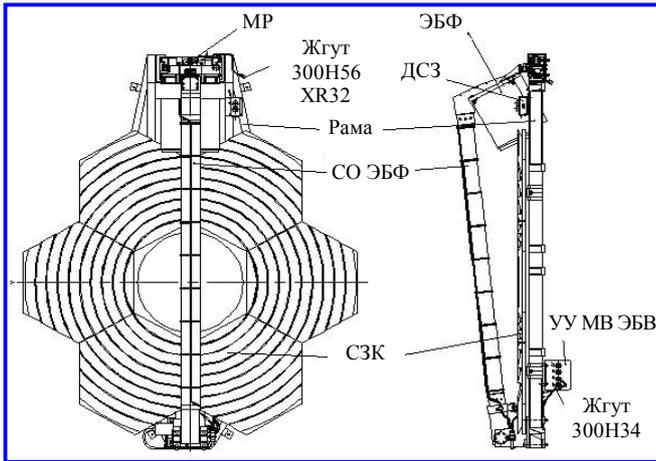


Рис. 8. Общий вид модуля ТУС в стартовом (зачекованном) положении

прямой линии (трек). Орбитальный детектор ТУС, установленный на спутнике, состоит из зеркал-концентратора диаметром около двух метров, в фокусе которого расположен приёмник ультрафиолетового излучения – мозаика из 256 фотоумножителей. Именно такой космический телескоп позволит зарегистрировать ультрафиолетовое излучение широких атмосферных ливней частиц, вторгающихся в ночную атмосферу в виде очень быстрых (длительностью в микросекунды) треков отдельных заряженных частиц. А по количеству зарегистрированных фотонов можно оценить энергию первичных частиц.

Измерения частиц, поток которых чрезвычайно мал (достаточно сказать, что при энергии  $10^{19}$  эВ на Землю попадает 1 частица на  $\text{км}^2$  в год) делает космический метод их регистрации вне конкуренции с наземными установками. Телескоп ориентирован в надири и регистрирует события в атмосфере Земли.

#### Блок детектирования рентгеновского и гамма-излучения (БДРГ)

Прибор предназначен для мониторинга и локализации гамма-источников на небесной сфере в диапазоне энергий 30 кэВ – 10 МэВ, а также выработки управляющего сигнала (триггера) для записей в памяти информации от широкоугольных оптических камер (ШОК). Прибор ориентирован в зенит и регистрирует события во Вселенной.

Помимо этого, БДРГ обеспечит:

- мониторинг наблюдений транзитных астрофизических явлений («рентгеновские новые», «гамма-репиторы» и др.;
- тайминг мягкого гамма-излучения рентгеновских двойных звёзд и пульсаров;
- патруль солнечного излучения в гамма-диапазоне.

#### Оптические камеры сверхширокого поля зрения – ШОК

Прибор ШОК состоит из двух широкоугольных камер, поле зрения которых находится в области детектирования гамма-всплесков другими приборами, расположенными на борту спутника «Ломоносов».

Поле зрения каждой камеры составляет 1000 квадратных градусов, максимальная скорость съёмки 5 – 7 кадров/с.

Фактически камеры непрерывно снимают «фильм», часть которого по управляющему сигналу от детекторов БДРГ может быть передана на Землю. Между всплесками возможна обработка изображений с целью поиска оптических транзиентов: сверхновых звёзд, новых звёзд, всплесков «сирот», астероидов и объектов ближнего космоса и космического мусора.

Следует отметить, что установка ШОК будет новым экспериментом с камерами сверхширокого поля на орбите Земли. Особый интерес вызывает отработка методов регистрации опасных астероидов и космического мусора из космоса.

#### Детектор ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения UFFO

Прибор UFFO предназначен для изучения гамма-вспышек и состоит из рентгеновского телескопа с кодирующей маской UBAT, определяющего направление прихода рентгеновского излучения с энергией 5 – 200 кэВ, и 20-сантиметрового ультрафиолетового оптического телескопа, регистрирующего излучение с длиной волны 200 – 650 нм.

#### Прибор ДЭПРОН

Прибор ДЭПРОН (дозиметр электронов, протонов, нейтронов) предназначен для измерения поглощённых доз и спектров линейной передачи энергии от высокоэнергичных электронов, протонов и ядер космического излучения, а также регистрации потоков тепловых и медленных нейтронов. Прибор обеспечивает измерение:

- поглощённой дозы:  $10^{-5}$  Гр –  $10^{+1}$  Гр;
- мощности поглощённой дозы:  $10^{-6}$  Гр/ч –  $10^{-1}$  Гр/ч;
- плотности потока заряженных частиц:  $1 - 10^4$  частиц/( $\text{см}^2\text{с}$ );
- плотности потока нейтронов с энергией от  $10^{-3}$  до  $10^2$  эВ :  $0,1 - 10^2$  нейтрон/( $\text{см}^2\text{с}$ ).

#### Детектор заряженных частиц ELFIN-L

Прибор ELFIN-L (Electron Loss and Fields Investigation for Lomonosov) состоит из трёх приборов: магнитометра (Flux Gate Magnetometer, FGM) и детекторов энергичных электронов и протонов

(Energetic Particle Detector for Electrons, EPDE и Energetic Proton Detector for Ions, EPDI).

Основная научная задача – изучить механизмы потерь электронов и протонов в магнитосфере Земли с учётом того, что энергичные заряженные частицы создают большую угрозу космическим кораблям и космонавтам в космосе и могут приводить к сбоям в работе аппаратуры на спутниках.

На основании проводимых измерений будут улучшены модели радиационной среды, используемые для расчётов в космических приборах. Владение точными расчётами потоков высыпавшихся из поясов частиц поможет в изучении рентгеновских вспышек, часто наблюдаемых в стратосферных экспериментах.

Считается, что они вызваны потоками высыпавшихся в атмосферу релятивистских частиц:

Измеряемые параметры:

- диапазон энергий электронного детектора: 30 кэВ – 4,1 МэВ в 16 дифференциальных каналах;
- угол раскрытия детектора – 37 град., детектор направлен под углом 60 град. к зениту;
- разрешение трёхкомпонентного магнитометра – 5 пТл, чувствительности на частоте 1 Гц – 100 пТл.

### Прибор ИМИСС-1

Прибор ИМИСС-1 предназначен для проверки качества функционирования микроэлектромеханических инерциальных измерительных модулей в условиях космического пространства и возможности их использования для решения задач коррекции пространственной персональной ориентации в экстремальных условиях, в частности в автоматическом корректоре стабилизации взгляда.

Основным датчиком, обеспечивающим работу прибора ИМИСС-1, является микромеханический инерциальный измерительный модуль, который может регистрировать значение одной из составляющих линейного ускорения.

Будет проведено сравнение измеренных прибором значений с вычисленными на основе показаний гироскопов, входящих в состав штатной системы управления ориентацией, и данных о траектории движения космического аппарата.

В результате будет сделан как качественный вывод о возможности использования микроэлектромеханических инерциальных модулей в автоматическом корректоре стабилизации взгляда (наблюдения) космонавта, так и количественный – об изменении характеристик погрешностей измерения микросенсоров в условиях космического пространства по сравнению с земными условиями.

### Блок информации (БИ)

Блок информации предназначен для обеспечения управления комплексом научной аппаратуры, размещённым на КА «Ломоносов», и его оперативного и гибкого управления в ходе выполнения научной программы. Блок обеспечивает сбор, хранение и передачу на Землю телеметрической информации о работе КНА.

### Первые результаты ЛИ КА «Ломоносов»

После успешного запуска КА был взят на управление ЦУП КА «Ломоносов», созданным на базе АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

В настоящее время со спутником ведутся работы по программе лётных испытаний. Специалисты ВНИИЭМ проверяют работу всех его служебных систем и совместно с НИИЯФ МГУ проводят тестовые включения научной аппаратуры.

В самом начале был проверен ДЭПРОН – аппаратура мониторинга и исследования космической радиации. Известно, что радиация является наиболее опасным фактором в космическом пространстве и влияет как на работу различных систем КА, так и на безопасность человека в космосе. Данные от КА «Ломоносов» позволят специалистам не только вести мониторинг радиационной обстановки, но и исследовать физические явления, связанные с природой самой радиации, где пока остаётся немало нерешённых вопросов.

При обработке информации, получаемой с прибора ДЭПРОН, зарегистрировано получение всех четырёх типов информационных массивов: А, S, H, N. При этом массивы А и S следуют с предусмотренной регулярностью, раз в минуту и раз в 5 минут соответственно. Массивы H и N формируются по мере накопления данных измерений.

Данные массива А дают возможность построить динамику потоков регистрируемых частиц и мощности поглощённой дозы с секундным разрешением. На рис. 9. представлены в качестве примера данные о динамике показаний мощности поглощённой дозы, плотности потока заряженных частиц и нейтронов за период с 27 по 29 мая 2016 г. Можно видеть изменение всех параметров во времени, обусловленное орбитальным движением КА. Отчётливо наблюдаются возрастания мощности дозы при прохождении области Южно-Атлантической аномалии и на высокоширотных участках траектории.

Более подробно изменение параметров в течение суток 11 мая 2016 г. представлено на рис. 10. Розовой полосой отмечены интервалы времени, соответствующие прохождению КА через зону Южно-Атлантической аномалии (ЮАА).

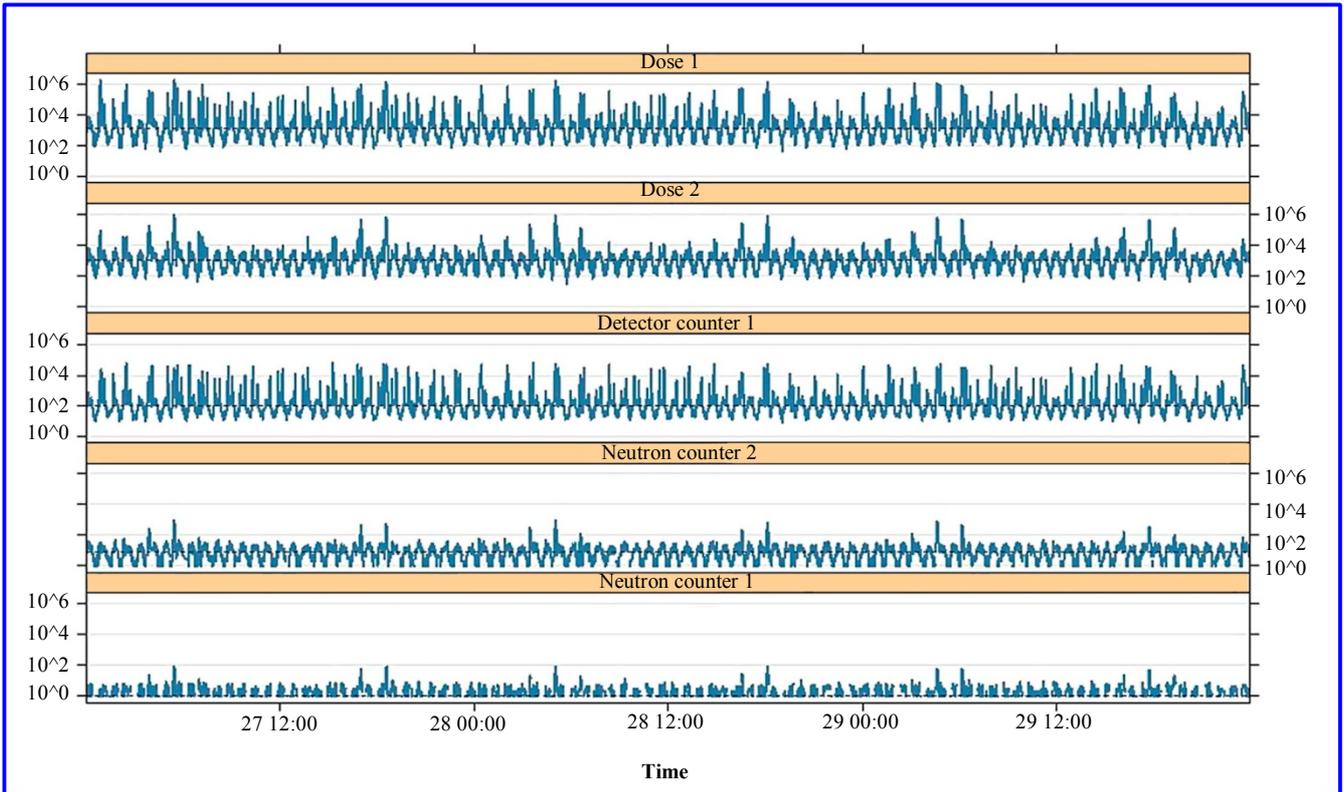


Рис. 9. Динамика показанной мощности поглощённой дозы, плотности потока заряженных частиц и нейтронов за период с 27 по 29 мая 2016 г.

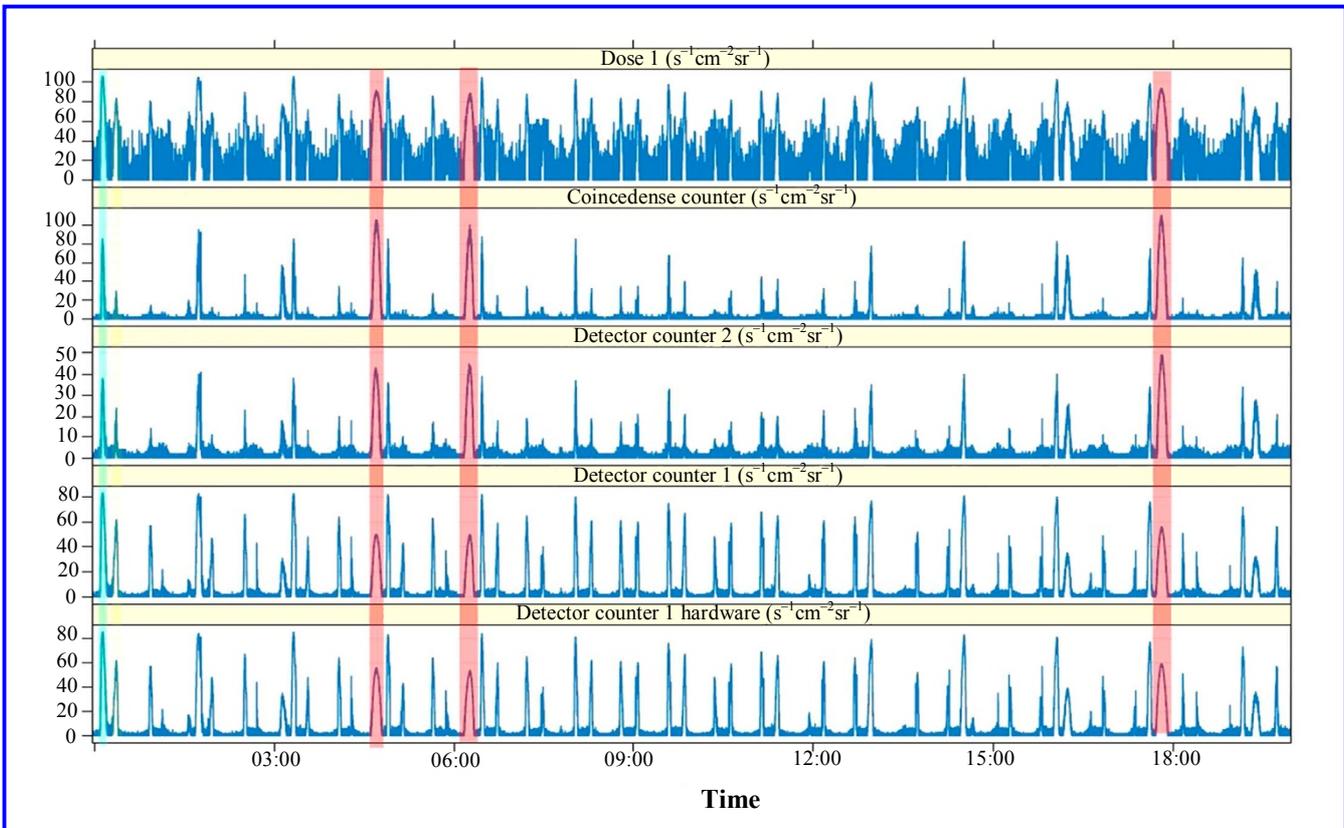


Рис. 10. Данные о мощности поглощённой дозы, плотности потока заряженных частиц и нейтронов в течение суток 11 мая 2016 г.

Информация, получаемая с прибора ДЭПРОН, позволяет достаточно подробно представить изменение параметров во времени. На рис. 11 одно из прохождений зоны ЮАА изображено более подробно. Можно видеть структуру изменения потока частиц в зоне аномалии.

Массивы S содержат информацию о спектрах энерговыделений в детекторах, характеризующих ионизационные потери регистрируемых частиц. На рис. 12 представлен пример спектра энерговыделений, зарегистрированный в зоне ЮАА.

Таким образом, в ходе первых включений подтверждена способность прибора ДЭПРОН регистрировать потоки и спектры энерговыделений заряженных частиц космического излучения, а также нейтронов и передавать полученную информацию в БИ для последующей передачи на Землю.

Впервые в космосе заработали два уникальных мини-телескопа ШОК с полем зрения по 1000 квадратных градусов каждый. Эти телескопы предназначены для синхронных оптических наблюдений самых мощных взрывов во Вселенной – гамма-всплесков (гамма-всплески – это самое мощное явление во Вселенной, космический взрыв, во время которого выделяется огромная энергия – примерно такая же, как при взрыве сверхновых звёзд, но за одну секунду! До сих пор природа гамма-всплесков наряду с ускорением космических лучей предельно высоких энергий остаётся одной из основных загадок современной науки).

Являясь прообразом будущей космической системы оповещения об астероидной опасности и предупреждения столкновения с техногенными объектами, в будущем эти приборы войдут в состав единой, объединённой с наземной инфраструктурой системы роботизированных телескопов (например, МГУ «Мастер») и составят её космический сегмент. Уже при непродолжительном тестовом включении с этих приборов получены первые изображения объектов движущихся на фоне неподвижных звёзд.

Затем был успешно протестирован прибор ИМИСС-1, предназначенный для регистрации микроускорений в рамках программы исследования компенсации расстройств органов зрения человека в условиях микрогравитации, а также проверен спектрометр рентгеновского и гамма излучений БДРГ, предназначенный именно для исследований гамма-всплесков.

Прибор БДРГ был включён 11 мая 1016 г. в резервном режиме (с пониженным питанием ФЭУ), с 25 мая был переведён в основной режим, в котором работает до настоящего времени.

Периоды, в течение которых присутствуют данные БДРГ, показаны на рис. 13. Здесь приведены сильно усреднённые данные в нескольких каналах из мониторинговых кадров БДРГ. Из рисунка видно, что в мае прибор включался эпизодически, это было связано с циклограммой полётного тестирования всех приборов КА «Ломоносов». С середины июня по настоящее время прибор БДРГ работает практически непрерывно. За время работы прибора было проведено ~100 сеансов связи. При текущих настройках БДРГ с прибора поступает в среднем ~400 Мб информации за сеанс (первичные двоичные данные в несжатом виде).

Данные, полученные с помощью прибора БДРГ, состоят из информационных кадров нескольких типов. Кроме кадров «Мониторинг» (по 16 каналов с трёх детекторных блоков с временным разрешением 100 мс) регулярно с интервалом в 15 с передаются подробные энергетические спектры

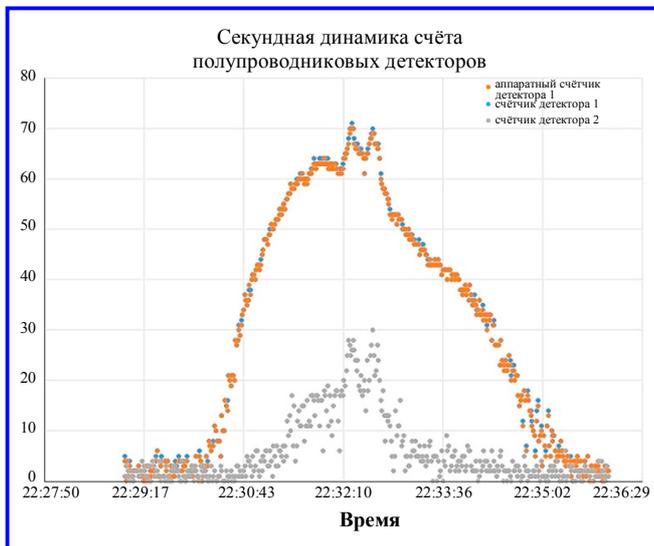


Рис. 11. Динамика изменения плотности потока частиц за одно прохождение зоны ЮАА

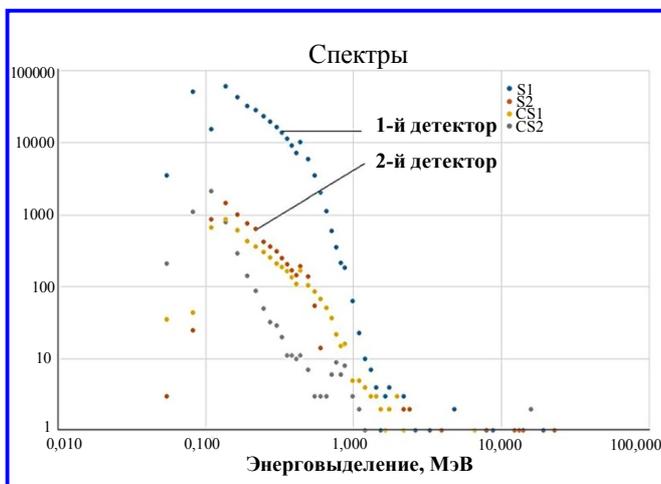


Рис. 12. Спектр энерговыделений, зарегистрированный в зоне ЮАА

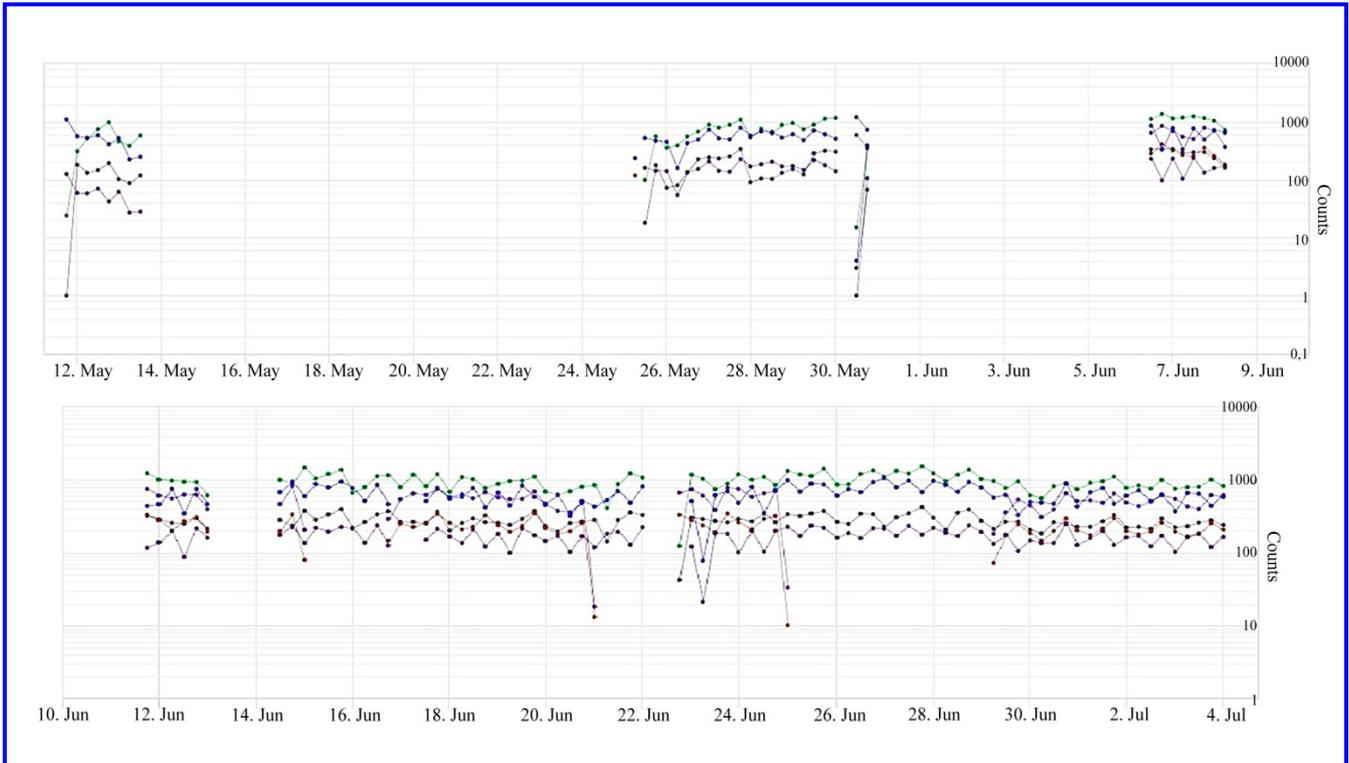


Рис. 13. Интервалы времени, в течение которых присутствуют данные прибора БДРГ

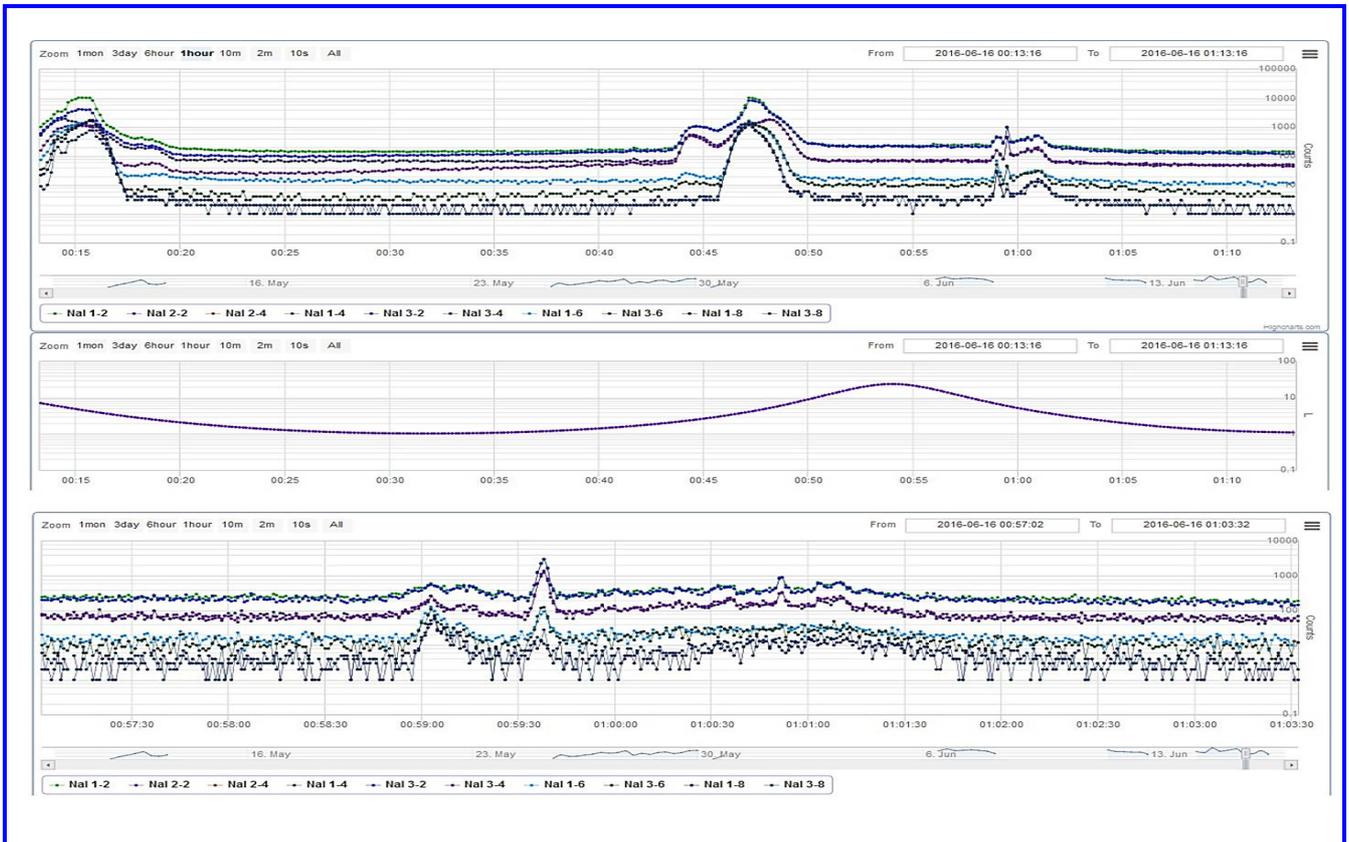


Рис. 14. Вариации показаний прибора БДРГ географической природы. Верхний рисунок – данные БДРГ за 1 час. Средний рисунок –  $L$ -координата. Нижний рисунок – участок данных при пролёте внешнего радиационного пояса 10.06.2016, 01:00 с

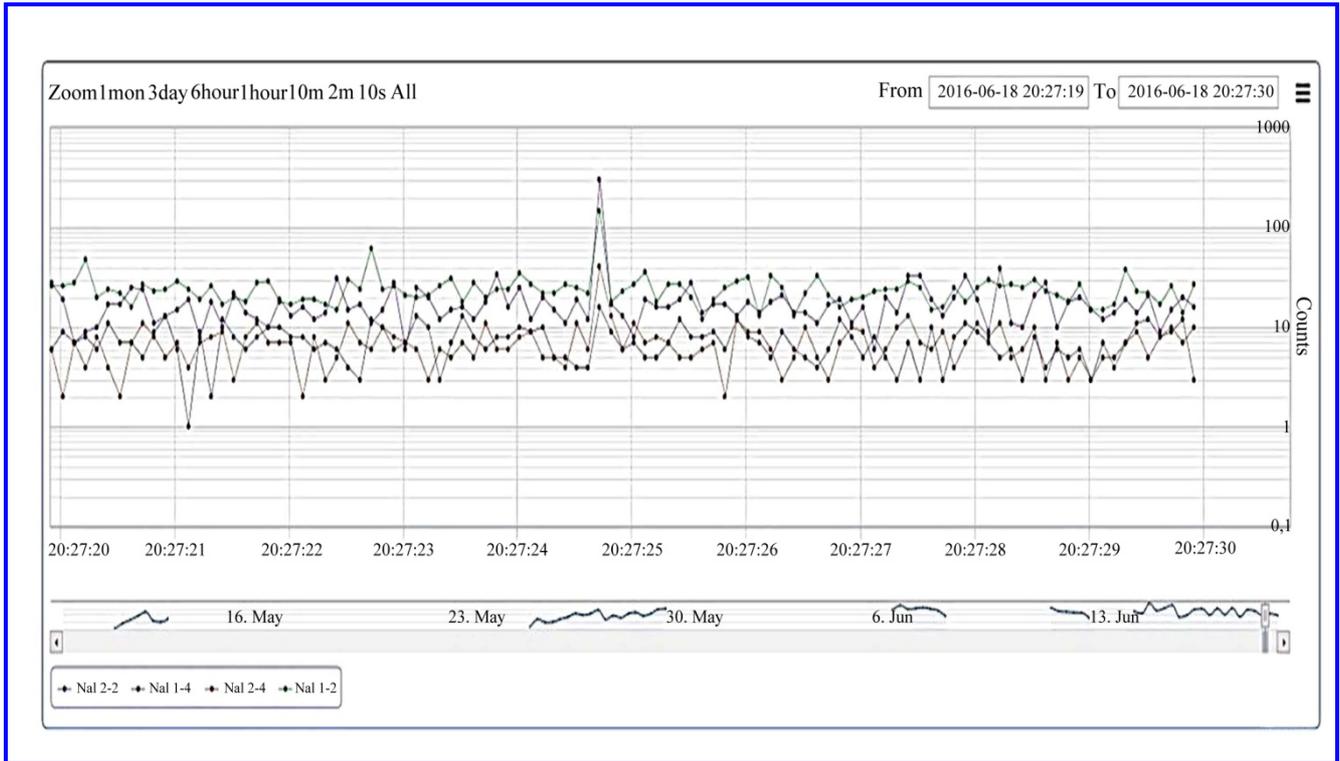


Рис. 15. Временной ряд показаний БДРГ, содержащих вспышку SGR 18 июня 2016 г. в 20:27:25

(6 спектров – 724 канала) и кадры «2D-диаграмм», представляющие собой последовательную запись первичных данных для определённого числа зарегистрированных гамма-квантов.

Кроме описанных выше типов данных, формируемых регулярно, прибор БДРГ осуществляет проверку наличия возрастаний потока, которые могут быть связаны со всплесками различной природы. В случае обнаружения значимого возрастания прибор БДРГ «вырабатывает триггер», по которому осуществляет более подробную запись показаний. Наиболее значимые триггеры передаются для фиксации подробных показаний прибора ШОК.

Поскольку фоновые показания гамма-спектрометра на низкой полярной орбите испытывают сильные вариации, связанные с радиационными поясами Земли, используется сложный алгоритм выработки триггера, требующий тонкой настройки. До 12 июня 2016 г. прибор БДРГ работал с настройками, которые были использованы для предполётных наземных испытаний. 12 июня была осуществлена запись обновленного конфигурационного файла, учитывающего особенности радиации на орбите. За июнь было получено более 1000 триггеров трёх типов: «быстрого» с характерным временем 10 мс, «медленного» (1 мс) и «сверхмедленного» (20 мс). Большинство из них отражают реакцию прибора на изменения показаний геогра-

фической природы. Такие триггеры являются фоновыми для задачи исследования гаммы-всплесков, однако подробная запись данных на границе радиационного пояса может быть полезна сама по себе для исследования квазизахваченных и высыпающих частиц. Пример такой вариации показан на рис. 14.

Результаты исследования вспышек магниторов (Soft Gamma – Repitter, SGR). Прибором БДРГ было зафиксировано две вспышки от источника данной природы.

Первая из них наблюдалась 18 июня 2016 г. в 20:27:25. Вспышка имеет характерную длительность ~100 мс и относительно мягкий спектр. Временной ряд показаний для этой вспышки изображён на рис. 15.

Вторая вспышка того же источника, зафиксированная прибором БДРГ, произошла 20 июня 2016 г. в 15:16:34. На рис. 16 виден узкий пик, соответствующий этой вспышке. Длительность пика составляет ~300 мс. Наличие подробной записи по триггеру позволило провести анализ кривой блика с миллисекундным временным разрешением.

Соответствующая зависимость от времени показаний прибора во всём диапазоне энергий представлена на рис. 17.

На рис. 18. показаны кривые блеска с разрешением 10 мс для трёх энергетических каналов (NaI (TI) с энерговыделениями 20 – 40 кэВ, 40 – 70 кэВ и > 70 кэВ). Из графиков видно, что спектр в течение всплеска становится более мягким.

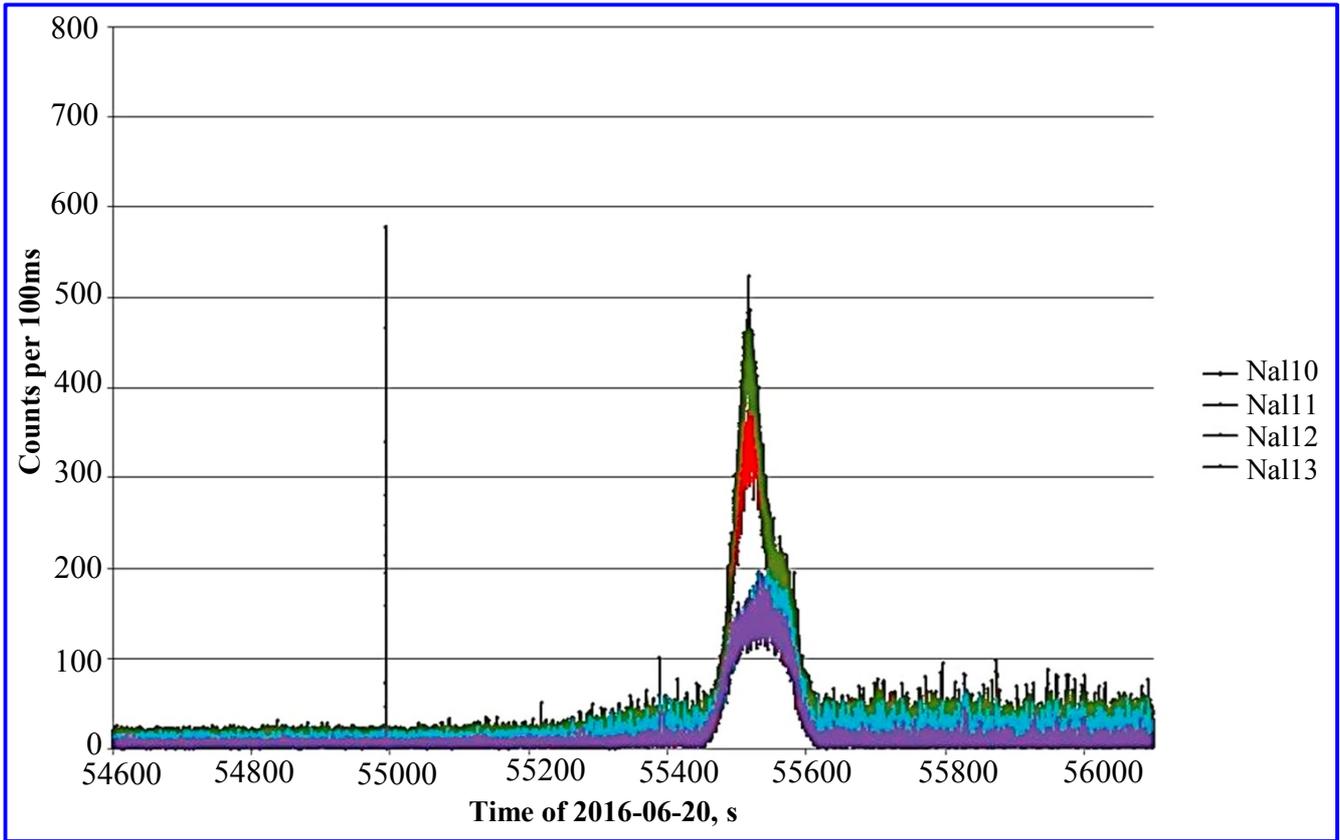


Рис. 16. Временной ход показаний прибора БДРГ в момент вспышки SGR 20 июня 2016 г. в 15:16:34

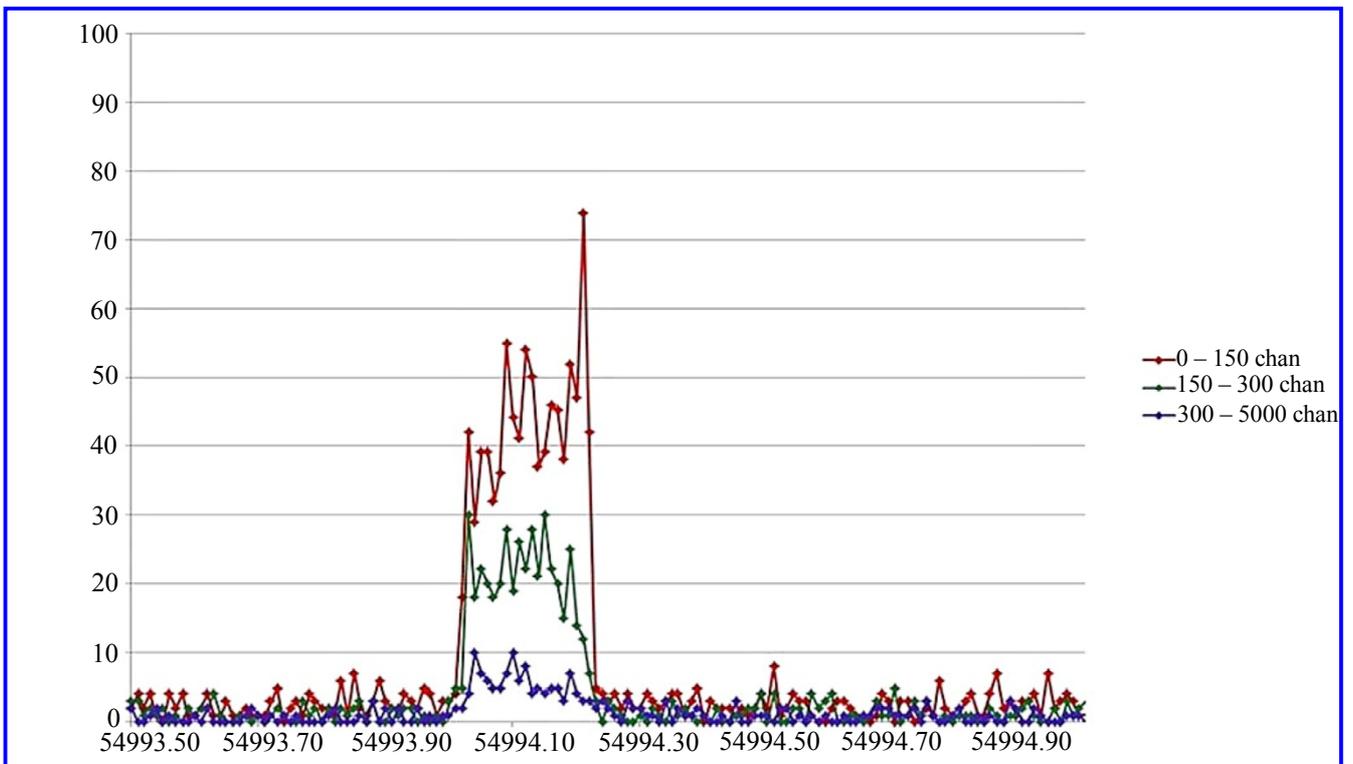


Рис. 17. Временной профиль вспышки SGR 20 июня 2016 г. в 15:16:34 с разрешением 1 мс (весь диапазон прибора БДРГ)

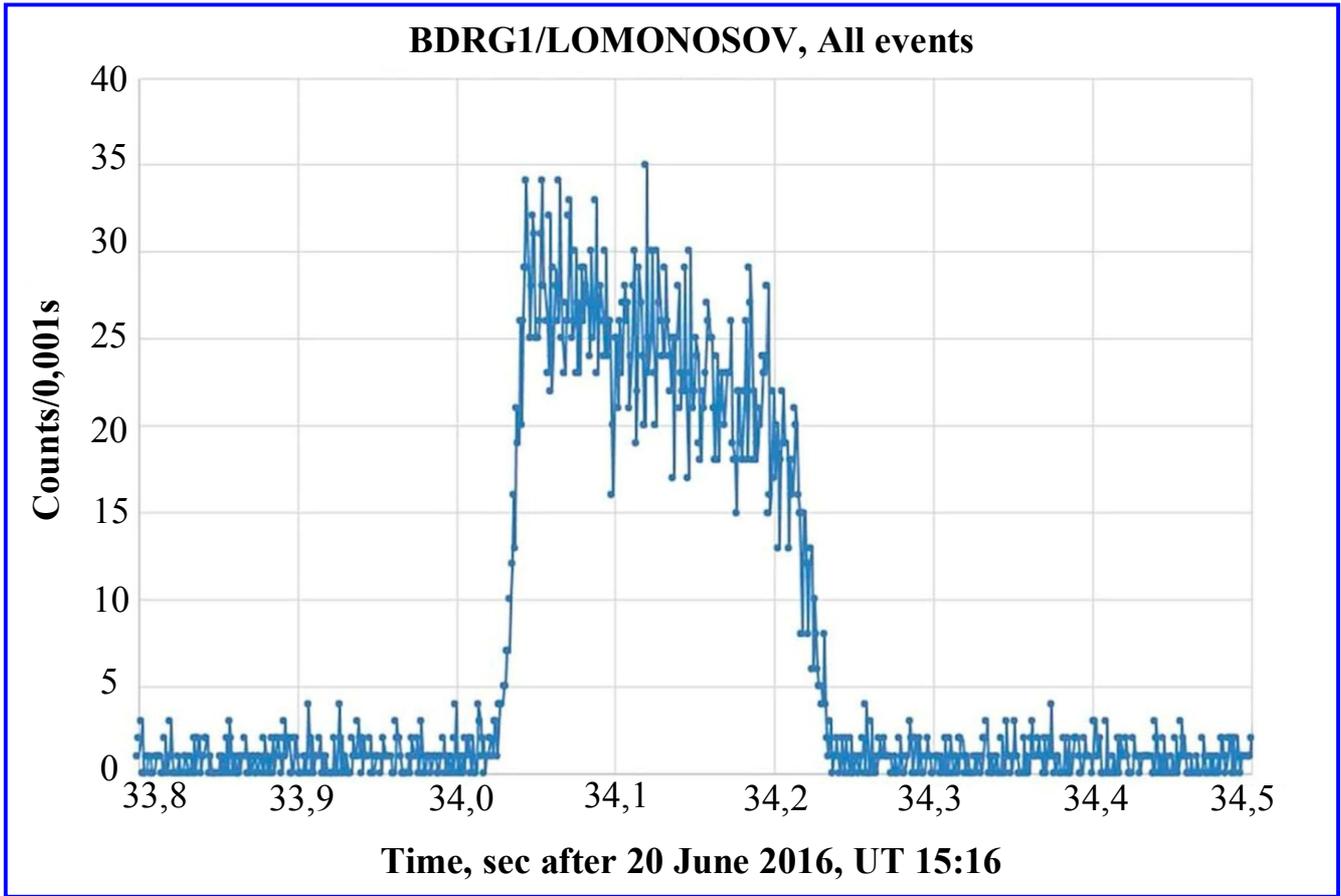


Рис. 18. Временной профиль вспышки SGR 20 июня 2016 г. в 15:16:34 с разрешением 10 мс в энергетических каналах NaI (TI) с энергывыделениями 20 – 40 кэВ, 40 – 70 кэВ и >70 кэВ

Исследование космических гамма-всплесков (GRB). За время наблюдения было зафиксировано гамма-излучение от двух космических гамма-всплесков (GRB). Временные профили этих всплесков показаны на рис. 19 и 20.

Исследование солнечной вспышки 19 июня 2016 г. прибором БДРГ (Блок детекторов Рентген – Гамма) было зафиксировано жесткое рентгеновское излучение (HXR), генерированное в солнечной вспышке класса C1.7 (начало 11:44:00 мирового времени, максимум 11:58:00, окончание 12:09:00). Произошла эта вспышка в активной области NOAA 12558, имевшей в этот день координаты N11W30.

Временной ход зарегистрированного на КА «Ломоносов» рентгеновского всплещного излучения приведён на рис. 21 (красная линия). Для сравнения сплошной чёрной линией показано изменение потока мягкого рентгеновского излучения (SXR) по данным эксперимента на КА GOES-15, серой линией – производная потока SXR. Видно, что в соответствии с эффектом Ньюперта временная зависимость HXP повторяет временной ход производной SXR.

Развёрнут в рабочее положение и другой астрофизический прибор – УФ-телескоп «ТУС», большой зеркальный телескоп (площадь зеркала составляет 2 м<sup>2</sup>) с очень высоким временным разрешением (менее 1 микросекунды). Он будет исследовать на ночной стороне Земли космические лучи внегалактического происхождения – частицы самых больших энергий из всех известных человечеству. Попадая в атмосферу Земли, они инициируют свечение в ультрафиолетовом диапазоне, которое и регистрирует этот телескоп. Это первая в мире попытка показать эффективность данного метода. При этом, помимо регистрации космических частиц, телескоп также будет наблюдать разнообразные процессы в самой атмосфере Земли, например, кратковременные явления типа спрайта, джетов, эльфов и др. – разнообразные электромагнитные разряды в верхних слоях атмосферы Земли. Это совсем молодая область физики, и высокочувствительные измерения с высоким временным разрешением позволят лучше понять механизмы инициирования таких атмосферных процессов.

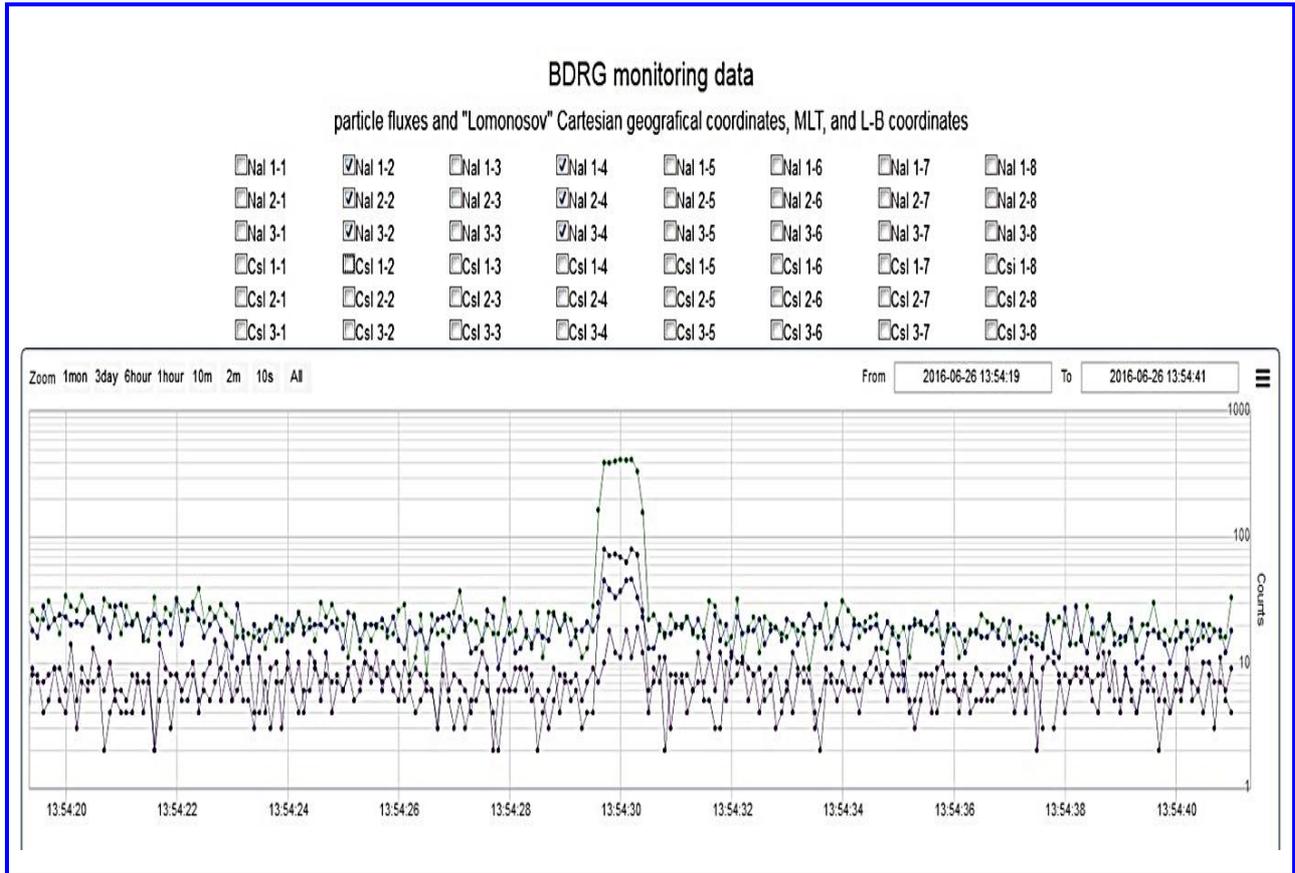


Рис. 19. Гамма-всплеск 26 июня 2016 г. 13:54:30

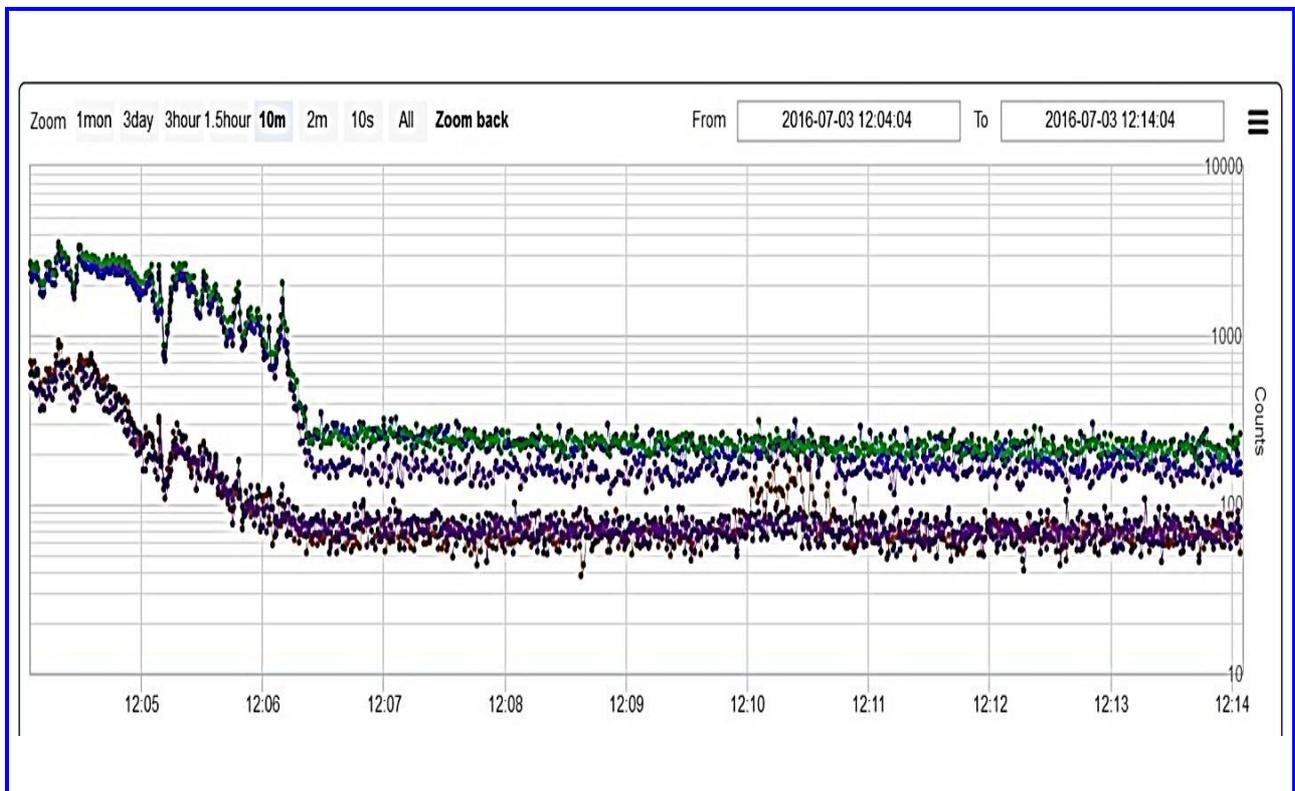


Рис. 20. Гамма-всплеск 3 июля 2016 г. 12:10:05

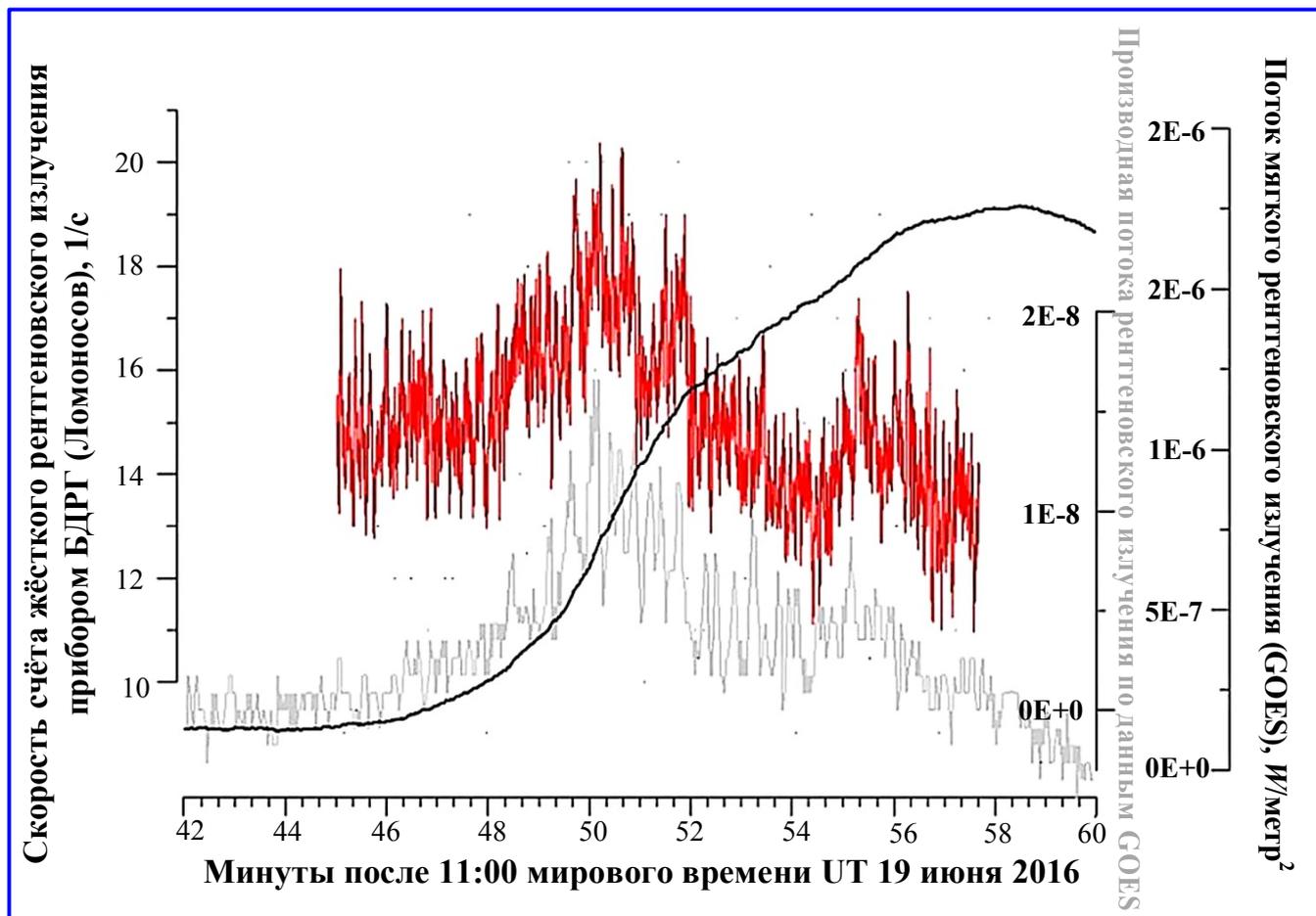


Рис. 21. Временной ход показаний БДРГ во время солнечной вспышки 19 июня 2016 г. в сравнении с данными по мягкому рентгеновскому излучению с КА GOES

Все проверенные приборы служебного и научного назначения работают устойчиво. Научные данные передаются без искажений.

Следует отметить, что КА «Ломоносов» станет первой российской обсерваторией, способной регистрировать излучение космических объектов от гамма-диапазона до оптического.

### Заключение

Спутник «Ломоносов» станет четвёртым запущенным космическим аппаратом, разработанным по заказу МГУ и созданным при его участии.

МГУ – единственный вуз в нашей стране, который регулярно осуществляет запуск подобных научных и образовательных спутников.

КА «Ломоносов» создан на базе служебной платформы «Канопус», разработанной в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» и имеет более широкий круг научных задач по сравнению с предшественниками.

Данные, полученные с КА, будут доступны всему научному сообществу. В ходе реализации проекта сложилась международная кооперация,

одним из участников которой является Нобелевский лауреат по физике 2006 года Джордж Фитцджеральд Смит из США.

В сфере его научных интересов находится как раз физика космических лучей и космических гамма-всплесков – то, что принято называть астрофизикой высоких энергий. Один из приборов, установленных на КА, сделан при непосредственном участии его сотрудников.

Создание научных космических аппаратов – перспективное направление развития МГУ, в деятельности которого ставка делается на космонавтику и астрофизику.

### Литература

1. Научно-исследовательский космический аппарат «Ломоносов». Научное издание. – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. – 138 с.
2. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В» № 1. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – 110 с.

Поступила в редакцию 13.12.2017

**Леонид Алексеевич Макриденко**, доктор технических наук, генеральный директор, т. (495) 365-56-10.  
**Сергей Николаевич Волков**, доктор технических наук, 1-й заместитель генерального директора, т. (495) 366-42-56.  
**Александр Викторович Горбунов**, кандидат технических наук, заместитель генерального директора, т. (495) 623-41-81.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

**Рашид Салихович Салихов**, кандидат технических наук, заместитель генерального директора.  
(АО «НИИЭМ»).

**Владимир Павлович Ходненко**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, т. (495) 624-94-98.  
E-mail: vniiem@orc.ru.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

## SCIENTIFIC SPACECRAFT «LOMONOSOV»

**L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov,  
R. S. Salikhov, V. P. Khodnenko**

*Lomonosov spacecraft (SC) is an international project implemented by scientists, postgraduate and undergraduate students from South Korea, Spain, Canada, USA, Poland, Germany, Denmark, Norway and Italy. The spacecraft has been developed in accordance with the Assignment of the Government of Russia No. СИ-П7-5987 dated 31.08.2010 on the basis of Canopus-V space platform designed by 'VNIIEМ Corporation' JC. This platform was used for the development of Canopus-V No.1 and Belarusian Satellite which were successfully launched in 2012. The works under the Lomonosov project were performed as per State Contract with Lomonosov Moscow State University (MSU). This project is dedicated to the memory of the great Russian scientist Mikhail Lomonosov, the founder of MSU. The prime developer of Lomonosov SC is 'VNIIEМ Corporation' JC. The main developer of mission hardware is the Institute of Nuclear Physics at Lomonosov Moscow State University. Lomonosov SC was launched from the Vostochny Cosmodrome and put into orbit by Soyuz-2 (phase 1a) with Volga upper stage. The article specifies the purpose and scientific tasks of Lomonosov SC. The spacecraft main characteristics and equipment, as well as mission hardware designation and characteristics are described in the article.*

**Key words:** spacecraft, cosmic rays, energy spectrum, space gamma-ray bursts, upper atmosphere, optical range, gamma range, transient light phenomena, charged particles, cosmic rays, radiation belts.

### List of References

1. Scientific and research spacecraft Lomonosov. Scientific publication. – М. : JC «VNIIEМ Corporation», 2015. – 138 p.
2. Canopus-V space system comprising Canopus-V No. 1 for real-time monitoring of technological and natural disasters. – М. : FGUE «NPP VNIIEМ», 2011. – 110 p.

**Leonid Alekseevich Makridenko**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Director General, tel.: (495) 365-56-10.  
**Sergei Nikolaevich Volkov**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), First Deputy Director General, tel.: (495) 366-42-56.  
**Aleksandr Viktorovich Gorbunov**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Deputy Director General, tel.: (495) 623-41-81.  
(JC «VNIIEМ Corporation»).

**Rashit Salikhovich Salikhov**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Deputy Director General.  
(JSC «NIIEМ»).

**Vladimir Pavlovich Khodnenko**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Chief Researcher,  
tel.: (495) 624-94-98, e-mail: vniiem@orc.ru.  
(JC «VNIIEМ Corporation»).