

НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

2. Результаты научных исследований по завершенным космическим проектам, полученные российскими учеными в 2014-2015 годах

Эксперимент РЭЛЕК на спутнике «Вернов»

Основными задачами эксперимента РЭЛЕК (релятивистские электроны) на спутнике *Вернов* являются:

- изучение транзитных (быстропротекающих) энергичных явлений (*Transient Energetic Phenomena, TEP*), наблюдающихся в атмосфере Земли. Под *TEP* здесь рассматриваются земные гамма-вспышки (*Terrestrial Gamma Flashes, TGF*) и транзитные световые явления (*Transient Luminous Events, TLE*)
- исследование механизмов ускорения и высыпаний магнитосферных релятивистских электронов и их возможного воздействия на верхнюю атмосферу Земли.

Комплекс научной аппаратуры (КНА) РЭЛЕК установлен на малом космическом аппарате, получившем наименование *Вернов* в честь основоположника отечественной космофизики академика Сергея Николаевича Вернова. Аппарат выполнен на базе платформы «Карат», разработки и производства НПО им. С.А. Лавочкина. Общий вид космического аппарата изображен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид спутника *Вернов*.

Спутник имеет следующие характеристики:

- масса – 283 кг;
- точность ориентации – 6 угл. мин;
- точность стабилизации – $0.0015^{\circ}/с$;
- скорость передачи данных – 5 Мбит/с.
- Рабочая орбита спутника – солнечно-синхронная, апогей – 830 км, перигей – 640 км, наклонение – 98.4° , период обращения – 100 мин.

Основной режим работы научной аппаратуры – мониторинговые наблюдения, когда все приборы КНА включены и работают одновременно. При этом обеспечивается регулярный сброс данных на Землю в объеме до 1.2 Гбайт в сутки. Запуск спутника был осуществлен 8.VII.2014.

В состав КНА входят пять приборов: ДРГЭ, ДУФ, «Телескоп-Т», комплекс НЧА-РЧА и БЭ. Общий вид аппаратуры представлен на Рис. 2.



Рис. 2. Общий вид приборов аппаратуры РЭЛЕК.

При проведении космического эксперимента на спутнике *Вернов* все приборы КНА (ДРГЭ, ДУФ, Телескоп-Т, НЧА, РЧА) соединяются с блоком электроники БЭ, от которого в процессе работы получают питающее напряжение и в который передают собранную научную информацию. Управление режимами работы приборов производится через БЭ КНА.

Прибор ДРГЭ предназначен для наблюдения всплесков гамма-излучения атмосферного и астрофизического происхождения, а также высыпаний магнитосферных электронов релятивистских и субрелятивистских энергий

Прибор состоит из трех блоков: двух идентичных блоков ДРГЭ-1, ДРГЭ-2 и блока ДРГЭ-3. Физико-технические характеристики прибора указаны в табл. 1. Оси детекторов блоков ДРГЭ-1, ДРГЭ-2 направлены в местный надир с точностью $\pm 3^\circ$. Оси детекторов блока ДРГЭ-3 направлены следующим образом: ось детектора №1 – в местный зенит, детектора №2 – против вектора скорости космического аппарата, ось детектора №3 под углом 90° к плоскости,

образованной векторами скорости и направлением в местный зенит (перпендикулярно плоскости орбиты). Точность ориентации осей детекторов $\pm 3^\circ$. Поле зрения детекторов, в пределах 60° от оси, не затеняется другими частями конструкции КА.

Таблица 1.

	ДРГЭ-1(2)	ДРГЭ-3	Всего
Энергетический диапазон			
фотонов	0.01-3 МэВ	0.05-3 МэВ	
электронов	0.5-10 МэВ	0.2-15 МэВ	
протонов	10-100 МэВ	5-100 МэВ	
Эффективная площадь сцинтилляционного детектора	$4 \times 120 = 480 \text{ см}^2$ (для 4 детекторов)	2.5 см^2	
Поле зрения	$2\pi \text{ ср} (\pm 90^\circ)$	$1.2 \text{ ср} (\pm 60^\circ)$	
Масса	$\sim 10.4 \text{ кг}$ (для блока)	$\sim 2.8 \text{ кг}$	$\sim 23.6 \text{ кг}$
Габариты	$(0.36 \times 0.36 \times 0.18) \text{ м}^3$	$(0.23 \times 0.3 \times 0.18) \text{ м}^3$	
Информативность	$\sim 150 \text{ МБт/сут}$	$\sim 70 \text{ МБт/сут}$	$\sim 370 \text{ МБт/сут}$
Потребляемая мощность	$\sim 9 \text{ Вт}$ (для блока)	$\sim 7 \text{ Вт}$	$\sim 25 \text{ Вт}$

Прибор ДУФ, как и «Телескоп-Т», предназначен для изучения процессов в верхних слоях атмосферы по измерениям в ультрафиолетовом (УФ) и инфракрасном диапазонах: свечение атмосферы возникающего от сгорания микрометеоритов и предметов деятельности людей по освоению космоса,

вспышечные явления природного (высотные электрические разряды) и техногенного характера.

Прибор ДУФ представляет собой моноблок в составе двух фотодетекторов на основе фотоэлектронных умножителей. Габаритные размеры прибора 130×95×65 мм, масса 0.7 ± 0.04 кг, энергопотребление при нормальных условиях и напряжении питания 27 В не более 2.5 Вт. Прибор ДУФ устанавливается вне гермоконтейнера на внешней поверхности космического аппарата так, чтобы поле зрения детекторного узла в пределах $\pm 25^\circ$ не затенялось посторонними предметами и конструкциями.

Прибор «Телескоп-Т» (MTEL/RELEC) регистрирует тонкую структуру свечения атмосферы в ультрафиолетовом (УФ) и красном диапазонах. Это моноблок, в состав которого входят: 2 микроэлектромеханических зеркала (МЭМЗ), 2 мультианодных ФЭУ (МФЭУ) и платы электроники.

Датчики этого прибора измеряют фон и всплески излучения в диапазонах длин волн 300-400 и 600-700 нм. Габаритные размеры 500×123×77 мм, масса $3,9 \pm 0,2$ кг, энергопотребление при нормальных условиях и напряжении питания 27 В не более 8 Вт. Прибор установлен на внешней поверхности МКА. Ось детектора направлена в местный надир с точностью $\pm 3^\circ$. Поле зрения детектора в пределах $\pm 25^\circ$ и не затеняется посторонними предметами и конструкциями. Временное разрешение этого прибора составляет 10 мкс

Комплекс НЧА-РЧА предназначен для контроля электромагнитных излучений и тока в плазме в широком диапазоне частот. Блоки комплекса размещаются как на наружной штанге, так и на термостатированной платформе объекта. Они нормально функционируют и сохраняют свои характеристики в условиях пониженного давления, до 10^{-14} мм рт.ст, и при температуре окружающей среды от -30 до $+50^\circ$ С для блоков, расположенных на платформе и от -150° С до $+150^\circ$ С для блоков, расположенных на штанге. Блоки, входящие в состав этого комплекса, не имеют резонансных частот ниже 40 Гц.

Прибор НЧА (низкочастотный анализатор) включает детекторы ОНЧ излучений и состоит из 6 блоков: датчика феррозондового магнитометра (Д-ФМ), блока электроники феррозондового магнитометра (БЭ ФМ), двух идентичных электрометров (комбинированных волновых зондов КВЗ-1 и КВЗ-2), индукционного магнитометра (ИМ) и процессора спектрального анализа ПСА(SAS3-R). Взаимное расположение датчиков обеспечивает измерение трех компонентов магнитного и электрического полей. Диапазон измерений – не менее 64000 нТл, неортогональность компонент датчика, не более 1°, частота оцифровки 250 Гц.

Прибор РЧА (радиочастотный анализатор) измеряет три компоненты электрического поля, оцифровывает и анализирует принимаемые сигналы в диапазоне от 50 кГц до 15 МГц. Он состоит из блока анализатора РЧА-Е и антенны для измерения электрических компонент электромагнитного поля РЧА-АЕ. Частотное разрешение 10 кГц, временное – 25 нс.

Физико-технические характеристики блоков приборов НЧА и РЧА представлены в табл. 2.

Таблица 2

Прибор НЧА			
Блок	Размеры (мм)	Масса (кг)	Потребление (Вт)
Д-ФМ	∅(40±0.3)х62	0.13±0.01	< 0.1
БЭ-ФМ	148.4х85х40	0.3±0.03	< 0.25
КВЗ-1, КВЗ-2	∅(64±0.3)х(325±0.8)	0.40±0.04	< 0.25
ИМ	∅(24±0,3)х212	0.15±0.015	< 0.1
ПСА(SAS3-R)	150х200х40	1.1±0.1	< 5

Прибор РЧА			
Блок	Размеры (мм)	Масса (кг)	Потребление (Вт)
РЧА-Е	(192±0.2)х(149±0.2)х(91.5±1)	1.5±0.2	< 10.0
РЧА-АЕ	54х26х66	0.2±0.02	< 0.1

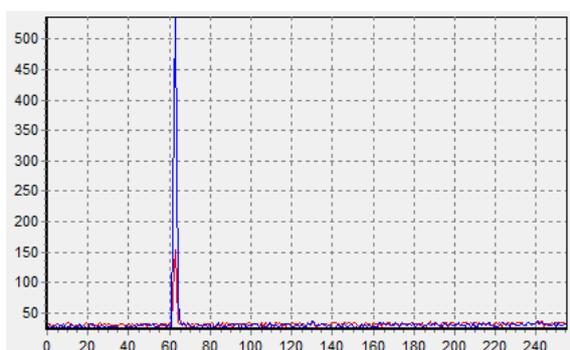
Прибор БЭ (блок электроники) обеспечивает: подачу питания и контроль потребляемого тока на все приборы комплекса, выдачу команд и массивов управления приборами, сбор и передачу научной и телеметрической информации, трансляцию сигналов точного времени в приборы, обеспечение работы системы событий. Он состоит из трех блоков: блока контроллера питания приборов и двух идентичных блоков концентратора целевой информации – основного и резервного. Общая масса прибора – 2.1 кг, энергопотребление – 5 Вт, объем передаваемой информации – до 1 Гбайт/сутки.

В ходе эксперимента получена важная научная информация:

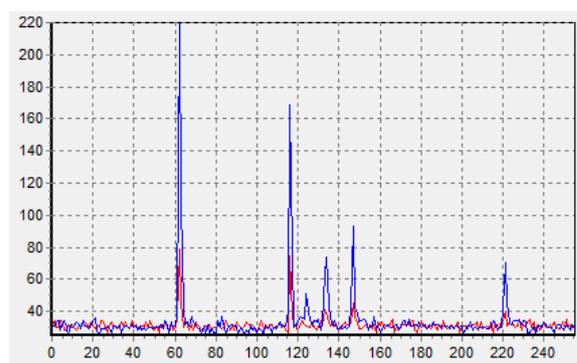
- - зарегистрировано около 10 000 всплесков УФ и красного излучения, подтверждены данные эксперимента на спутнике «Татьяна-2» о наблюдении серий вспышек УФ излучения над областями активного грозообразования, в то же время обнаружены всплески УФ излучения заведомо не связанные с грозовой активностью, некоторые из них наблюдались на высоких широтах;
- - обнаружено свечение атмосферы в УФ и красном диапазоне, имеющее техногенное происхождение – оно может быть связано с работой низкочастотных передатчиков, при этом частота модуляции передающей станции, возможно, детектируется в ионосфере в результате нелинейных процессов;

- зарегистрированы кандидаты в гамма-всплески атмосферного происхождения, показано, что всплески гамма-излучения не сопровождаются возрастаниями интенсивности излучения в других диапазонах электромагнитного спектра, указывающими на прямую связь этих всплесков с молниями или внутриоблачными разрядами;
- зарегистрировано несколько космических гамма-всплесков астрофизического и солнечного происхождения, определены их временные и спектральные характеристики;
- обнаружено множество высыпаний магнитосферных электронов, в том числе в области зазора между внутренним и внешним поясами, зарегистрированы значимые потоки электронов в низкоширотных областях под радиационными поясами.

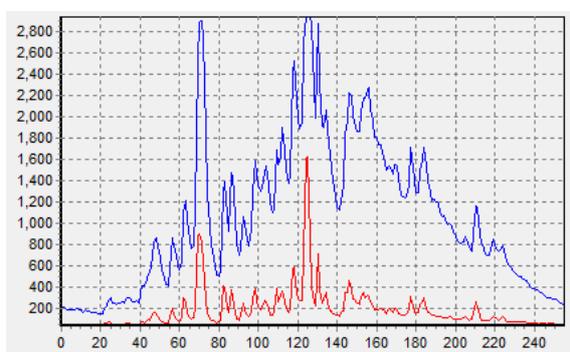
В настоящее время продолжается анализ научной информации.



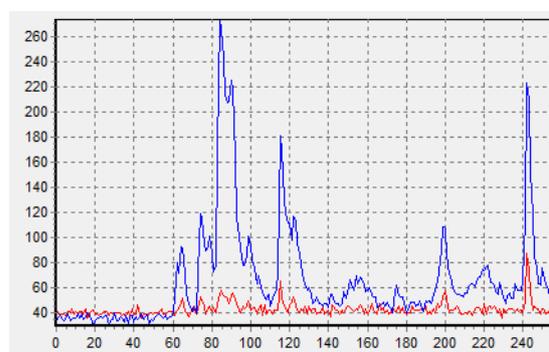
a)



b)



c)



d)

Рис. 3. Примеры временной структуры вспышек в УФ и ИК диапазонах: а) и б) – короткие всплески в УФ и ИК каналах, с) – длительное событие, d) – вспышки в УФ диапазоне, не сопровождающиеся значительными возрастаниями в ИК канале.

Климов Павел Александрович, pavel.klimov@gmail.com и

Свертилов Сергей Игоревич, sis@coronas.ru

Публикации

1. Panasyuk M.I., Svertilov S.I., Bogomolov V.V., et al. RELEC mission: Relativistic electron precipitation and TLE study on-board small spacecraft, *Advances in Space Research*, 2016, 57(3), 835-849, doi 10.1016/j.asr.2015.11.033
2. Свертилов С.И., Панасюк М.И., Богомолов В.В. и др. Высотные разряды и высыпания магнитосферных электронов как элементы глобальной электрической цепи: данные космического эксперимента РЭЛЕК на спутнике «Вернов», Доклад на Второй Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь», 5-9 октября 2015 г., Геофизическая обсерватория Борок.