

УДК 629.7

АКАДЕМИЧЕСКИЙ МИКРОСПУТНИК ЧИБИС-М

© 2014 г. Л. М. Зелёный¹, А. В. Гуревич², С. И. Климов¹, В. Н. Ангаров¹, О. В. Батанов¹,
А. В. Богомолов³, В. В. Богомолов³, Л. Боднар⁵, Д. И. Вавилов¹, Г. А. Владимирова¹,
Г. К. Гарипов³, В. М. Готлиб¹, М. Б. Добрян¹, М. С. Долгоносов¹, Н. А. Ивлёв⁷,
А. В. Калужный¹, В. Н. Каредин¹, С. О. Карпенко⁷, В. М. Козлов¹, И. В. Козлов¹,
В. Е. Корепанов⁴, А. А. Лизунов⁸, А. А. Ледков¹, В. Н. Назаров¹, М. И. Панасюк³,
А. П. Папков⁶, В. Г. Родин¹, П. Сегеди⁵, С. И. Свертилов³, А. А. Суханов¹, Ч. Ференц⁵,
Н. А. Эйсмонт¹, И. В. Яшин³

¹Институт космических исследований РАН, г. Москва

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

³Научно-исследовательский институт ядерной физики им.

⁴Львовский центр Института космических исследований Национальной академии наук Украины и Национального космического агентства Украины, г. Львов, Украина

⁵Университет Этвоса, г. Будапешт, Венгрия

⁶Научно-исследовательская лаборатория аэрокосмической техники ДОСААФ, г. Москва

⁷Инженерно-технологический центр “СКАНЭКС”, г. Москва

⁸НПО Машиностроения, г. Реутов

Поступила в редакцию 21.03.2013 г.

В статье отражены научные задачи и конструкторские разработки микроспутниковой платформы *Чибис* и комплекса научной аппаратуры “Гроза”, направленные на изучение новых физических механизмов высотных электрических разрядов в атмосфере. Приводится описание комплекса научной аппаратуры “Гроза”, который является единым “летающим” прибором, определяющим основные требования к микроспутнику *Чибис-М*. Изложены вопросы наземной подготовки космического эксперимента, методики вывода в инфраструктуре *МКС* микроспутника на орбиту, командно-телеметрического управления в полете, приведены первые научные результаты.

DOI: 10.7868/S0023420614010117

ВВЕДЕНИЕ

В 1991 г. космическая обсерватория им. Комптона, измеряя мощность излучения космических источников гамма-лучей, таких как нейтронные звезды и остатки сверхновых, начала регистрировать яркие миллисекундные всплески гамма-излучения, идущего не из космического пространства, а со стороны Земли. Однако, до настоящего времени отсутствует полное представление о том, что могло вызвать эти атмосферные вспышки гамма-лучей. Имеют ли они отношение к удивительным атмосферным явлениям, наблюдаемым выше грозовых облаков на высоте до ~80 км и названным “спрайты” (от английского *sprite* – приведение, призрак). Считалось, что спрайты – следствие атмосферных молний, переносащих электроны между различными областями атмосферы или между атмосферой и Землей, и возникающей в результате неоднородного распределения электростатического заряда и образования электрических полей, разность потенциалов в которых может превышать 100 млн В [1]. Такие вто-

ричные электрические поля вблизи ионосферы способны вызвать лавинный разряд электронов высокой энергии, которые, столкнувшись с атмосферными атомами, испускают фотоны с еще более высокой энергией – гамма-лучи. Модель этого процесса, теоретически предсказанная в Физическом Институте РАН, получила название пробоя на убегающих электронах – ПУЭ [2]. Особенностью этого вида пробоя является то, что он происходит в низких электрических полях, но требует для своей инициации затравочных частиц высокой энергии. Одновременно рождается исключительно большое число электронов низких энергий. Движение этих электронов в электрическом поле грозы рождает мощный импульс радиоизлучения [3]. Принципиальную роль в инициации ПУЭ играют космические лучи высоких энергий [4]. Широкий атмосферный ливень (ШАЛ) содержит большое количество высокоэнергичных электронов, которые и служат требуемой затравкой пробоя. Развитие ШАЛ с частицами высоких энергий на больших высотах про-

исходит только, если он движется под углом, близким к горизонтальному. В этом случае происходит усиление ПУЭ и значительное увеличение его пространственного масштаба [5]. Именно поэтому, согласно модели, разряды на больших высотах (~12–20 км) носят столь мощный характер, как в радио, так и в гамма излучениях.

Для исследования новых физических процессов при высотных атмосферных грозных разрядах и механизмов формирования в них гамма-высышек, инфракрасных и ультрафиолетовых излучений, электромагнитных излучений в широком диапазоне частот необходимо проводить синхронные измерения в этих диапазонах с очень высоким (лучше единиц микросекунд) временным разрешением [6].

Ряд природных электромагнитных явлений, объединяемых в комплекс, именуемый “космическая погода” [7–12], происходящих в системе солнечный ветер–магнитосфера–ионосфера–атмосфера Земли, дают вклад в электромагнитные поля, регистрируемые в ионосфере. Классическим примером являются регистрируемые на спутниках излучения, возникающие при грозных разрядах, названные свистящими атмосфериками.

Исходя из аппаратно-методического опыта, имеющегося в ИКИ РАН, был определен состав комплекса научной аппаратуры (КНА) микро-спутника (МС) *Чибис-М* [13]. Следует отметить, что приборы КНА имеют аналоги, отработанные в ходе проведения ряда предшествующих проектов по фундаментальным космическим исследованиям.

2. КОМПЛЕКС НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ “ГРОЗА”

Перспективные направления развития экспериментальной физики требуют все более точных и высокоинформативных научных приборов. Более того, ситуация усложняется постоянным сокращением финансирования научных исследований, даже в развитых странах. Это обуславливает необходимость разработки и создания нового поколения научных приборов с малой массой, небольшой потребляемой мощностью и высоким уровнем метрологических параметров.

Важным фактором оказывается то, что оптимальный приборный состав комплекса научной аппаратуры для широкого ряда космических экспериментов может уложиться в общую массу менее 20 кг. Естественным становится вопрос создания микро-спутниковой платформы, способной обеспечить размещение КНА, ее бортовое обслуживание, передачу на Землю телеметрической информации и т.д. Благодаря успехам высоких технологий у исследователей появилась возмож-

ность выводить на орбиту полноценные научно-исследовательские аппараты малых размеров – массой менее ста килограммов (МС), обладающие целым рядом преимуществ по сравнению с тяжелыми КА.

Во-первых, стоимость запуска в космос объекта малой массы существенно ниже “обычной” и вполне “по карману” даже отдельному институту. Сравнительно небольшой срок подготовки аппарата, вкупе с невысокой ценой, существенно снижает возможные риски при неудачном выводе аппарата на орбиту. Во-вторых, МС более экологичны, так как для их вывода на орбиту сжигается значительно меньше горючего. В-третьих, отработав положенный срок и перейдя в более плотные слои атмосферы, МС полностью сгорает, не оставляя после себя космического мусора. Кроме этого, благодаря небольшому времени подготовки, можно создавать целые группировки МС, поддерживать которые относительно просто. Цикл разработки и подготовки к запуску большого научного спутника (например, орбитальной обсерватории) занимает от нескольких лет до десятилетия. За это время неизбежно устаревают научная аппаратура, что может существенно снизить эффективность научных исследований. Это естественная для любой космической техники проблема становится менее актуальной в случае микро-спутников, так как цикл их подготовки не так велик.

Впервые в практике фундаментальных космических исследований в ИКИ РАН с кооперацией создан КНА “Гроза” ориентированный на изучение физических процессов, связанных с атмосферными грозными разрядами [14, 15], и размещаемый на МС *Чибис-М* [16, 17].

Основные параметры приборов КНА “Гроза” следующие:

Рентген-гамма детектор – РГД (НИИЯФ МГУ) с диапазоном рентгеновского и гамма-излучения 0.02–1.0 МэВ [18, 19];

УФ детектор – ДУФ (НИИЯФ МГУ) спектра излучения от УФ (180–400 нм) до ИК (650–800 нм) [20];

Радиочастотный анализатор – РЧА (ИКИ РАН) в диапазоне частот 26–48 МГц [21];

Цифровая камера – ЦФК (ИКИ РАН) с пространственным разрешением 300 м и экспозицией 15 кадров/с [22];

Магнитно-волновой комплекс в диапазоне частот 100–40000 Гц – МВК: индукционный магнитометр – ИМ, комбинированный волновой зонд – КВЗ (ЛЦ ИКИ РАН и НКА Украины), процессор спектрального анализа – ПСА (Университет Этваса, Венгрии) [23];

Блок накопления данных БНД-Ч (ИКИ РАН) [24];

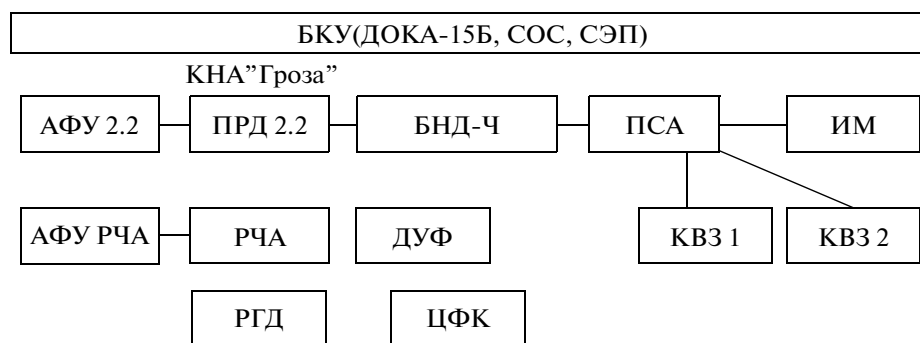


Рис. 1. Структурная схема *Чибис-М*: БКУ – бортовой комплекс управления; ДОКА-15Б – аппаратура дистанционного контроля, СОС – система ориентации и стабилизации, система электропитания; КНА “Гроза” – комплекс научной аппаратуры.

Передатчик 2.2 ГГц с антеннами – ПРД 2.2 ПИКИ РАН) [25].

На рис. 1 показана структурная схема КНА “Гроза”.

Состав КНА “Гроза” – комплексный и уникальный по ширине охвата энергетического диапазона и временному разрешению при ограниченной массе приборов. Следствием этой комплексности является то, что по технически-организационным показателям перечисленная выше аппаратура может рассматриваться как единый прибор. Это обусловлено и тем, что фактом регистрации высотного разряда (“события”) служит выработка блоком БНД-Ч единого триггера события на основе совпадения триггеров приборов РГД, РЧА, ДУФ. Алгоритмы выработки этих триггеров изложены в сборнике [16]. Вся телеметрируемая научная информация, накапливаемая в БНД-Ч, передается на наземные приемные пункты с помощью высокоинформативного передатчика ПРД 2.2 [25].

3. МИКРОСПУТНИКОВАЯ ПЛАТФОРМА ЧИБИС

Концепция “летающего прибора” [26] позволяет проводить научные космические исследования в России без привлечения дорогостоящих космических аппаратов, разрабатываемых предприятиями космической отрасли.

Более чем десятилетний опыт работы по изготовлению научно-исследовательских и научно-образовательных микроспутников, накопленный в СКБ КП ИКИ РАН, позволил по-новому взглянуть на проблемы разработки базовых конструкций и компоновочных решений при создании МС *Чибис-М*.

Первой задачей стало создание общего базового несущего конструктива-трансформера, который отвечает требованиям решаемой научной задачи и ограничениям, определяемым схемой выведения МС на орбиту с помощью ракеты-

носителя в качестве попутного груза к основной полезной нагрузке. В нашем случае, это ракета-носитель *Союз* и транспортно-грузовой корабль *Прогресс*.

Были проведены компоновочные работы по оптимальному (с точки зрения научной задачи) размещению научных приборов на базовом конструктиве-трансформере в последовательности, определяемой важностью получаемой от прибора научной информации.

Затем была проведена компоновка блоков и приборов комплекса служебной аппаратуры (КСА) МС *Чибис-М*. КСА обеспечивает функционирование всех систем и приборов МС *Чибис-М* в автономном орбитальном полете. Сложность компоновочных работ заключалась в обязательном учете моментов инерции всех систем и сведении их в заданную точку центра масс МС.

КСА состоит из:

базового конструктива-трансформера (механический конструктив МС);

бортового комплекса управления БКУ, включающего систему электропитания СЭП, командную и телеметрическую радиопередающую и навигационную аппаратуру НАП;

системы трехосной ориентации и стабилизации СОС, включая датчики определения ориентации (солнечные датчики, магнитометр) и исполнительные устройства, обеспечивающие требуемые развороты МС (по трем осям) в орбитальном полете вокруг центра масс, а также трехосную стабилизацию в заданном положении (гравитационные штанги, двигатели-маховики, электромагнитные устройства (ЭМУ));

пассивной системы обеспечения требуемого теплового режима (спецпокрытия).

В ходе работ, проведенных в ИКИ РАН совместно с кооперацией, академический МС *Чибис-М* (рис. 2) был изготовлен и прошел в 2011г. полный цикл наземных испытаний вместе с комплексом научной аппаратуры.

Основные технические характеристики микроспутника *Чибис-М*

Масса общая	~40 кг
КНА “Гроза”	10.8 кг
служебная аппаратура	12.6 кг
конструкция и система терморегулирования	16.6 кг
Орбита	круговая высотой ~500 км
Время активного существования	не менее 2 лет
Система ориентации и стабилизации (СОС):	
основная – электромеханическая (электромаховики) с магнитодинамическим (электромагниты) демпфированием; дублирующая – гравитационная (штанга)	
точность определения ориентации	до 2 угл. градусов
навигация	по системе GPS – ГЛОНАСС
Система передачи данных (ДОКА-15Б):	
радиолиния борт – Земля для передачи информации от КНА	1 Мбит/с
радиочастота передачи информации от КНА	2270 МГц
объем накопительной памяти комплекса научной аппаратуры	256 МБайт
минимальный суточный объем принимаемой от КНА информации	50 МБайт
радиочастоты командной и телеметрической линий	145435 МГц
Система бортового энергопитания (СЭП):	
мощность	~50 Вт среднесуточная
напряжение	12 ± 3 В
емкость БХБ	9.5 А ч
суммарная площадь солнечных батарей	0.4 м ²
Габариты микроспутника:	
в сложенном состоянии (прямоугольная призма) 605 мм (длина) × 370 мм (диаметр описанной окружности)	
в раскрытом состоянии (антенны и солнечные батареи) 1090 (длина) × 3860 (ширина) × 854 (высота)	
в раскрытом состоянии с учетом гравитационной штанги 1090 (длина) × 3860 (ширина) × 1802 (высота)	

4. ПОДГОТОВКА КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА “МИКРОСПУТНИК” И ВЫВОД НА ОРБИТУ МИКРОСПУТНИКА *ЧИБИС-М*

Решением Координационного научно-технического совета Федерального космического агентства по программам научных и прикладных исследований и экспериментов на пилотируемых космических комплексах (№ 01 от 29.03.2010 г.) в “Долгосрочную программу научно-прикладных исследований и экспериментов на РС МКС” включен эксперимент Микроспутник – Исследования физических процессов при атмосферных грозных разрядах на базе микроспутника *Чибис-М* с использованием грузового корабля *Прогресс*.

Доставка *Чибис-М* на орбиту осуществлялась в инфраструктуре РС МКС [27]. Для транспортировки *Чибис-М* и его непосредственного вывода на орбиту автономного полета в Специальном конструкторском бюро космического приборостроения ИКИ РАН (СКБ КП, г. Таруса), по согласованному с РКК “Энергия” Техническому за-

данию, был разработан и изготовлен транспортно-пусковой контейнер (ТПК).

Для отработки в рамках конструкторско-доводочных испытаний схемы и динамики выхода *Чибис-М* из ТПК в СКБ КП был разработан и изготовлен стенд вертикального обезвешивания, имитирующий условия невесомости при раскрытии элементов конструкции МС на орбите. Динамика выхода *Чибис-М* из ТПК, в условиях космического вакуума и температуры на освещенном и теневом участках орбиты, отработана в РКК “Энергия” в большой вакуумной камере, где был размещен стенд совместно с размещенным в ТПК микроспутником.

В ИКИ РАН проведен полный цикл наземной отработки ТПК с МС *Чибис-М*, после чего они доставлены на Технический комплекс космодрома Байконур. После проведения на ТК заключительных операций ТПК с *Чибис-М* был размещен в транспортно-грузовом корабле (ТГК) *Прогресс М-13М*, доставившем МС *Чибис-М* 2.XI.2011 на РС МКС.

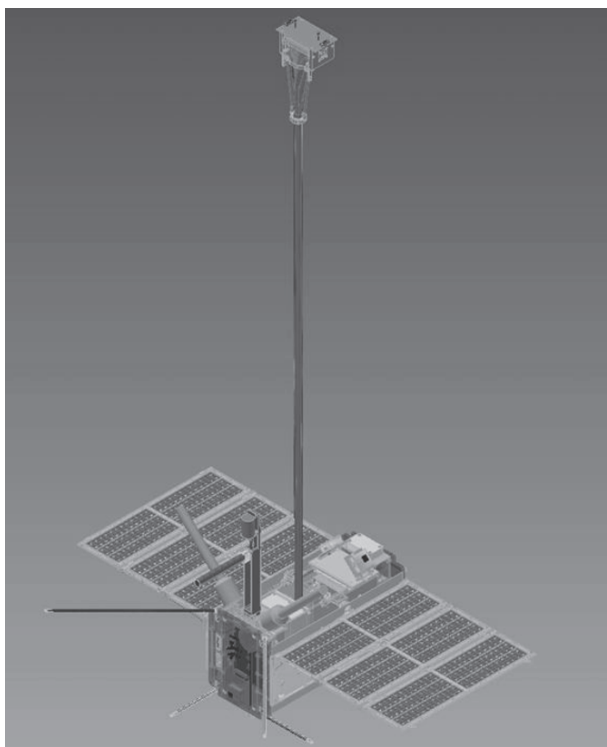


Рис. 2. Общий вид микроспутника Чибис-М.

Перед отделением от *МКС*, выполнившего свои функции ТГК, российские космонавты О. Кононенко и А. Шкаплеров подключили к ТПК кабели подзарядки аккумуляторов *Чибис-М* и командной линии на срабатывание электроступа механизма вывода *Чибис-М* из ТПК и установили ТПК с *Чибис-М* вместо стыковочного агрегата *Прогресс М-13М* (рис. 3).

Зафиксированный телевизионной камерой с борта *МКС* момент отделения ТГК засвидетельствовал штатное расположение ТПК с *МС Чибис-М* на стыковочном шпангоуте. После отделения от *МКС Прогресс М-13М* по специальной программе совершил маневр по поднятию своей орбиты на высоту 513 км.

Важной технологической операцией была организация специалистами РКК «Энергия» телевизионной трансляции в реальном времени момента выхода *МС Чибис-М* из ТПК и отделения его от *Прогресс М-13М*. Момент отделения был рассчитан так, чтобы это происходило на освещенном участке орбиты при определенном положении вектора скорости ТГК и направления на Солнце. Это обеспечивало хорошую экспозицию.

Видеосъемка с *Прогресс М-13М* (рис. 4), продолжавшаяся 9 мин и передававшаяся в режиме реального времени в Центр управления полетом *МКС*, зафиксировала, что все системы *МС* (солнечные панели, антенны аппаратуры дистанционного обслуживания космического аппарата – *ДОКА 15Б*, антенны прибора РЧА) раскрыты. По истечении времени, по изменению движения *МС*, было зафиксировано, что произошло программное включение системы ориентации.

Сразу после выведения на орбиту 25.1.2012 г. наземными средствами, созданными ИКИ РАН, была установлена командно-телеметрическая связь с *МС Чибис-М* и начался этап ввода служебных систем в эксплуатацию.



Рис. 3. Российские космонавты О. Кононенко и А. Шкаплеров устанавливают ТПК с *Чибис-М* на стыковочном шпангоуте *Прогресс М-13М*.

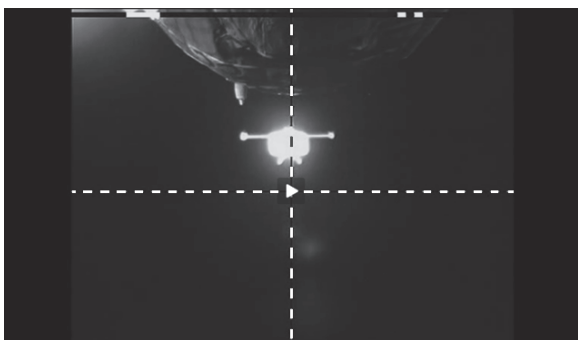


Рис. 4. Фиксация раскрытия всех механических систем МС *Чибис-М*.

5. НАЗЕМНЫЙ СЕГМЕНТ ПРОЕКТА ЧИБИС-М

Параллельно с бортовым сегментом проекта, включающем микроспутник с комплексами научной аппаратуры “Гроза” и служебных систем, для реализации проекта в ИКИ РАН был создан Наземный сегмент проекта – НСП, состоящий из Центра управления полетом проекта *Чибис-М* в ИКИ РАН – г. Москва и пяти наземных станций управления и приема научной информации: СКБ КП ИКИ РАН – г. Таруса; НИЛАКТ – г. Калуга и г. Красноярск, Университет Этвosa – г. Будапешт, Венгрия, ИФА ЧАН – г. Панска Вес, Чешская Республика.

Основными задачами НСП является прием телеметрической информации, ее обработка, визуализация и архивация, а также планирование работ и непосредственное управление микроспут-

ником. Для решения этих задач потребовалось создать информационную систему, не уступающую по своим функциональным характеристикам аналогичным системам более крупных космических проектов. Учитывая ограничения финансового характера, эту задачу удалось решить за счет применения инновационных подходов и последних достижений в области информационных технологий.

Опыт эксплуатации НСП свидетельствует о правильности использованных подходов и решений. Наземный сегмент может быть использован в качестве базовой платформы для других академических научных космических проектов.

По завершении этапа ввода в эксплуатацию служебных систем МС *Чибис-М* и НКУ начались физические измерения приборами КНА “Гроза”. На 20.XII.2012 МС *Чибис-М* совершил более 5000 витков на орбите, с ним проведено более 2000 сеансов связи (каждый день проводится 6–7 сеансов).

6. ОТРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИБОРАМИ КНА “ГРОЗА”

Каждый прибор КНА “Гроза” содержит кольцевую память (КП) имеющую фиксированный размер на несколько событий. Общий размер памяти прибора определяется максимальной длительностью события этого прибора, который задают постановщики эксперимента. Длительность события может регулироваться по командам. Пример: РЧА-50 мс, РГД-20 мс, ДУФ-100 мс. Телекомандами с Земли могут задаваться и другие

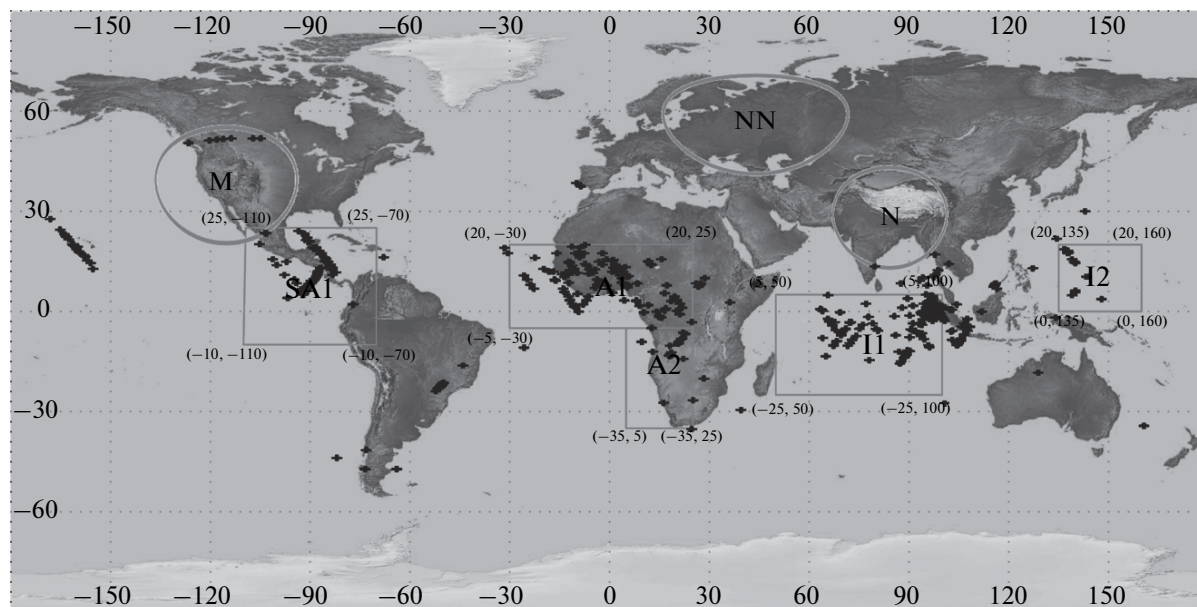


Рис. 5. Карта локализации географических районов с наибольшей статистикой регистрации триггера РЧА.

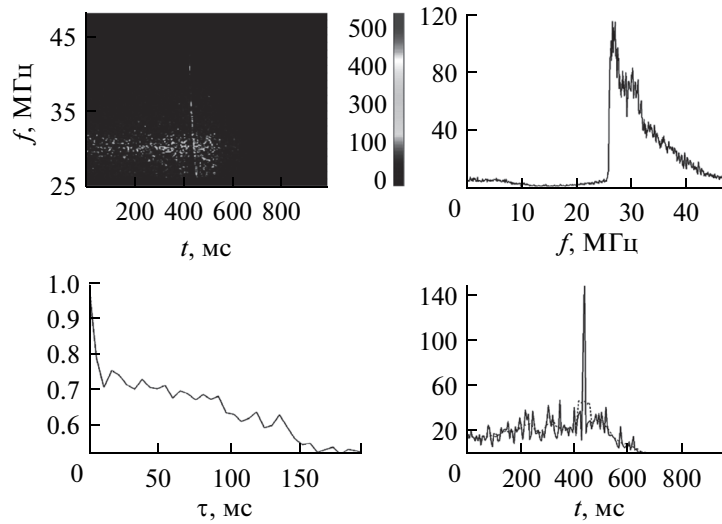


Рис. 6. Прибор РЧА. Пример молниевых разряда 9.V.2012, 11.29.08 UT. Спектрограмма (верхняя панель слева), спектр (верхняя справа), автокорреляция (нижняя слева) и временной сигнал в частотной полосе прибора (нижняя справа).

параметры оцифровки события: период оцифровки (дискретизация по времени), порог срабатывания критерия “событие произошло” (СП, триггер), размер “до” и “после” события. События происходят случайным образом, поэтому при записи в КП делается привязка к бортовому времени, оформление массива события (заголовок, нумерация и т.д.). В КП пишется только событие соответствующее критерию СП. При отсутствии события в КП продолжается запись измерений.

Анализ полученных данных показал [28], что на начальном этапе оптимальным вариантом регистрации молниевых разрядов является такой, когда команда о начале регистрации молниевых разряда (триггер) приборами КНА “Гроза” поступает от прибора РЧА, как наиболее скоростного прибора, измеряющего интенсивность радиоизлучений в характерном для грозовых разрядов диапазоне 26–48 МГц. Анализирующая часть прибора позволяет отделить скоростные, широкополосные сигналы, характерные для искомым высотных разрядов от других и на основе этого анализа подать команду на включение других приборов КНА.

С мая 2012 г. проводились работы по оптимизации параметров работы РЧА (выбор комбинации полосовых фильтров, порог срабатывания детекторов и т.д.). Оптимизация требовалась в целях уменьшения информации, записываемой на борту от событий, не связанных с молниевыми разрядами, а связанных с техногенными помехами и шумом, излучаемым центром Галактики. В результате этой работы получена карта локализации географических районов с наибольшей статистикой регистрации триггера РЧА (рис. 5), которая используется при формировании цикло-

грамм работы КНА “Гроза”, осуществляющих запрограммированное включение необходимых режимов работы как служебных систем МС (электропитание, ориентация и т.д.), так и научных приборов.

За 11 месяцев включений РЧА при пролете над выделенными районами накоплен значительный объем научной информации. На рис. 6 приведен пример сигнала, записанного по триггеру, имеющего характерный для грозовых разрядов динамическую спектрограмму, спектр, автокорреляционную функцию и волновую форму.

К настоящему времени прибором РЧА выделено порядка 300 записей триггеров дискретных молниевых разрядов, показавших (рис. 7), что на

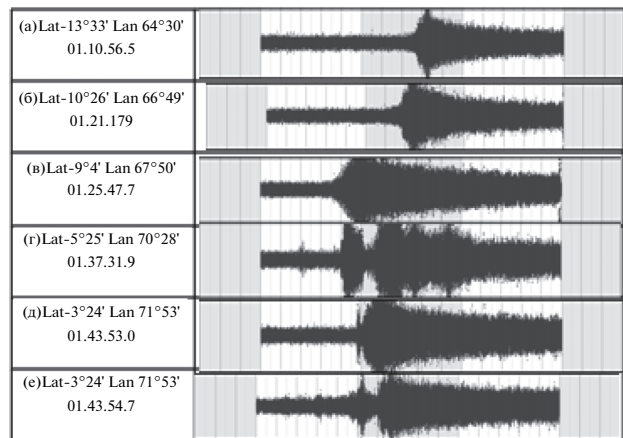


Рис. 7. Характерный пример волновой формы записи при срабатывании триггеров РЧА (оцифровка 96 МГц) в приэкваториальной зоне 27.IX.2012. Длительность каждой из выборок – 3 мск.

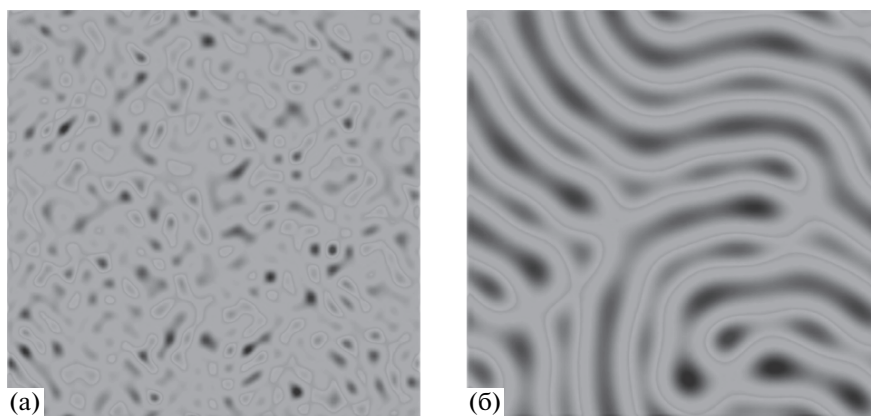


Рис. 8. Схематическое представление пространственного распределения токов в грозовом облаке (яркость цвета связана с воображаемой силой тока в данной конвективной ячейке). (а) – распределение токов во время регистрации РЧА “радиопотрескивания”; (б) – слияние случайно распределенных токовых систем в момент регистрации молниевое разряда.

самом деле пространственная структура грозового фронта имеет многомасштабный характер с определенной фрактальной размерностью [29]. По-видимому, инициация грозового разряда имеет много общего и с другими явлениями взрывного характера, например, магнитосферными суббуриями [30] и солнечными вспышками. Характерные широкополосные “радиопотрескивания”, наблюдающиеся перед разрядом (см. рис. 6) имеют свой аналог в процессе “onset” суббури, когда перед началом ее взрывной фазы происходит рост амплитуды и укрупнение масштабов низкочастотных электромагнитных флуктуации (рис. 8). Подготовка к началу взрывного процесса в таких случаях напоминает подготовку к сходу лавины (также сопровождаемую характерными звуковыми шумами). Иногда такие явления описываются в терминах теории самоорганизованной критичности (или SOC – self-organized criticality). Нам кажется, что аналогия процессов самоорганизующейся перестройки токовой системы (см. рис.8) в хвосте магнитосферы [30] и в грозовом разряде

[29] может оказаться весьма продуктивной. В дальнейшем мы планируем исследовать ее более глубоко.

Достаточно надежная статистика регистрация триггера РЧА позволила перейти к реализации режима работы КНА Гроза, называемому “работа по триггеру РЧА”, тогда другие приборы, получив от системы БНД-Ч протранслированный триггер, останавливают свою кольцевую память и тем самым фиксируют событие.

Так в режиме “работа по триггеру РЧА”, в частности, 19.V.2012 ДУФ зафиксировал данные (рис. 9), подтвердившие факт регистрации молниевое разряда. По соотношению интенсивностей ультрафиолетового и инфракрасного излучений можно с уверенностью сказать, что молниевый разряд произошел на высоте свыше 40 км.

Специфика работы прибора РГД (рентген-гамма детектор) потребовала организации для него режима работы по выработке собственного триггера. Рис. 10, 11 иллюстрируют пример регистрации прибором РГД собственного триггера – кандидата в атмосферные гамма-вспышки (Terrestrial Gamma-Ray Flashes, TGRF), которые, как предполагается, могут быть связаны с высотными молниевыми разрядами. Отмеченное событие было зафиксировано во время прохождения экватора 24.X.2012 (примерно в 03.20 UT).

На рис. 10 изображены мониторные показания четырех детекторов прибора РГД – средние за 1.6 с интегральные скорости счета фотонов (в энергетическом диапазоне более ~20 кэВ). Стрелкой отмечено время выработки триггера, соответствующего регистрации события. Видно, что в окрестности всплеска фон вполне однороден, что типично для области геомагнитного экватора, какие-либо возрастания, обусловленные магнито-

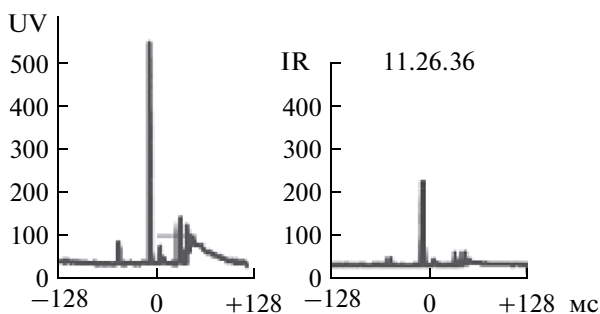


Рис. 9. Прибор ДУФ. Пример молниевое разряда 19.V.2012, 11.26.37 UT. UV – детектор ультрафиолетового излучения, IR – детектор инфракрасного излучения.

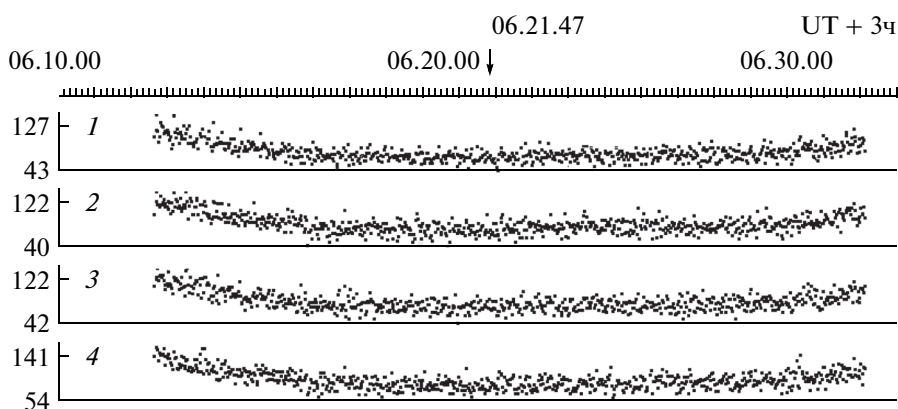


Рис. 10. Мониторные показания прибора РГД: средние за 1.6 с скорости счета детекторов № 1...4. Стрелкой отмечен момент срабатывания собственного триггера прибора.

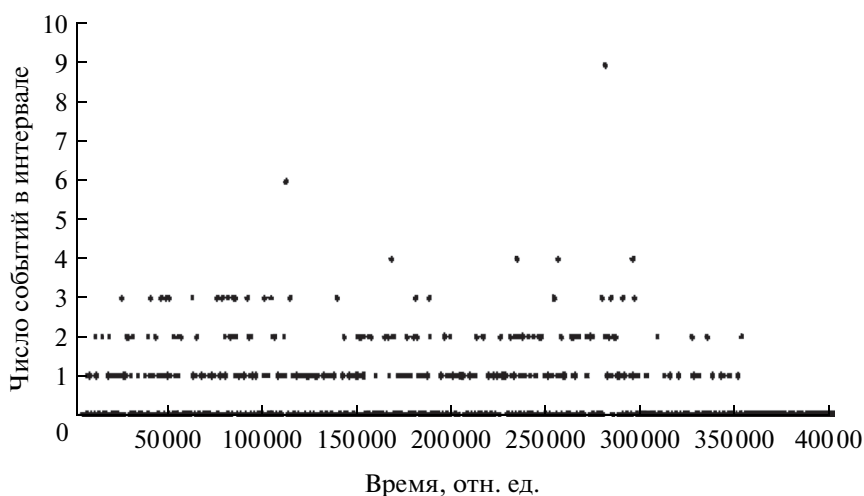


Рис. 11. Запись показаний прибора РГД с 3 мс усреднением после срабатывания собственного триггера прибора 24.X.2012 в 06.21.47.

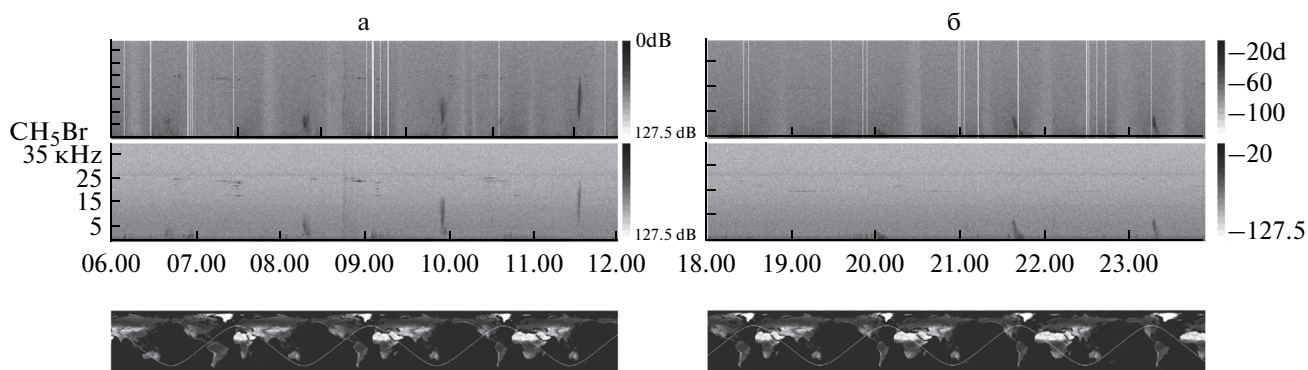


Рис. 12. Регистрация электрической (верхняя панель) и магнитной (средняя панель) компонент электромагнитных излучений на частотах ниже 15 кГц на $L > 4$ (а) – в южном полушарии; (б) – в северном полушарии (нижняя панель – проекция траектории Чибис-М на поверхность Земли).

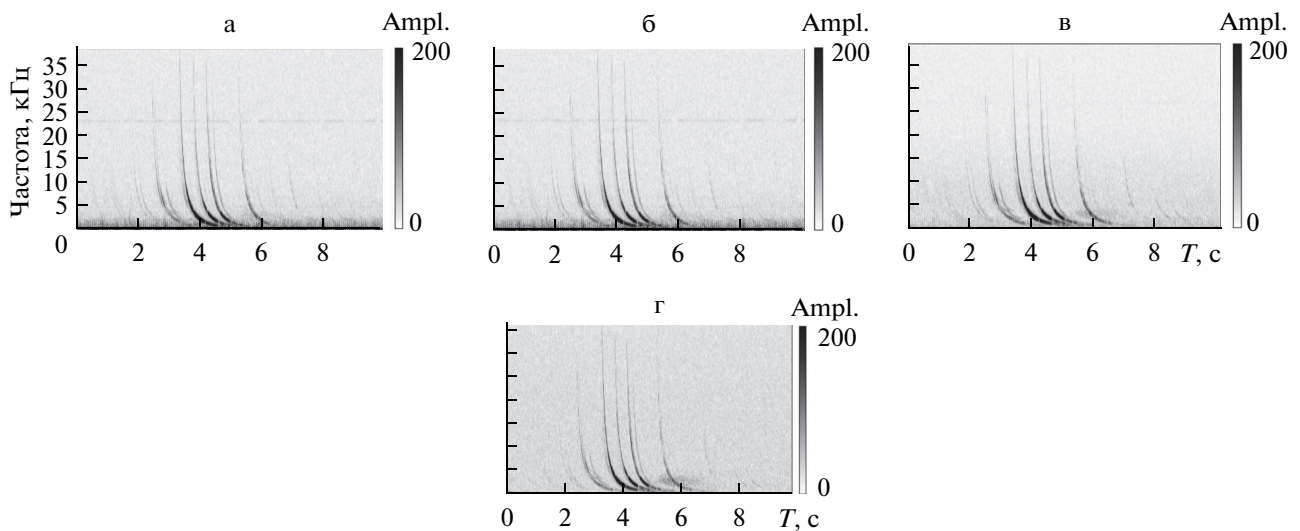


Рис. 13. МВК 8.VII.2012. Регистрация вистлерных электромагнитных излучений, компоненты: (а) — B_x , (б) — B_y , (в) — B_z , (г) — E .

сферными эффектами (высыпания энергичных электронов и т.п.) отсутствуют.

На рис. 11 показан подробный временной ход суммарного счета всех четырех детекторов, записанный в массиве, сформированном от собственного триггера прибора РГД. При этом весь временной интервал, соответствующий записи массива был разбит на интервалы по 3 мс. Видно, что в момент времени 03.21.47 UT наблюдалось 9 гамма-квантов за 3 мс, (в том числе в отдельных детекторах: 4, 3, 2 и 0 отчетов). При среднем темпе счета ~ 2 имп/с это возрастание соответствует ~ 6 с, что вместе с отсутствием имитаций магнитосферными электронами позволяет рассматривать его в качестве реального кандидата в TGRF.

Экспресс информация по МС *Чибис-М* как с КНА «Гроза», так и служебных систем (напряжение и ток аккумулятора, температура в различных точках, объем заполненной бортовой памяти и т.д.) оперативно представляется на сайте <http://tm.chibis.cosmos.ru/chibis/> для зарегистрированных пользователей.

Мониторинг электромагнитных параметров космической погоды. Магнитно-волновым комплексом — МВК, входящим в состав КНА Гроза реализуется параллельная научная задача — мониторинг электромагнитных параметров космической погоды [7–13, 23, 31–33]. МВК включает в себя два комбинированных волновых зонда (КВ31, КВ32) и одного индукционного магнитометра (ИМ), созданных в Львовском Центре ИКД НАНУ–ГКАУ, и прибора спектрального анализа ПСА (разработка VI-Electronics, Венгрия). МВК предназначен для изучения электромагнитных параметров в диапазоне частот 0.1–40 кГц с целью исследования вариаций плазменно-волновых

процессов в ионосфере, происходящих под влиянием грозовой активности, а также процессов в системе ЛАИМ (Литосфера–Атмосфера–Ионосфера–Магнитосфера).

На рис. 12, представлены результаты измерения на нескольких орбитах 1.IV.2012 (а) и 8.V.2012 (б), свидетельствующие о наличии интенсивных излучений в приполярных областях ($L > 4$).

В июне–октябре 2012 г значительное внимание было уделено изучению атмосфериков.

Атмосферики — (также просто *сферики*) электрические сигналы, создаваемые радиоволнами, излучаемыми разрядами молний. Вблизи земной поверхности происходят около 100 разрядов молний в 1 сек. Разряд молнии имеет 2 стадии: предразряд и основной разряд, различающиеся силой тока и спектром излучаемых радиоволн. Основной разряд излучает сверхдлинные волны, а предразряд — длинные волны, средние волны и даже короткие волны.

Максимум энергии атмосфериков лежит в области частот порядка 4–8 кГц. Если атмосферики создаются местными грозами, то их спектр определяется только спектром излучения грозового разряда. Если же источник — удаленная гроза, то спектр определяется также и условиями распространения радиоволн от очага грозы до радиоприемного устройства. Атмосферики обладают слабым затуханием и могут распространяться на значительные расстояния.

Некоторые атмосферики воспринимаются на слух как сигналы, частота которых непрерывно уменьшается. Такие *атмосферики* называются *свистящими* (или просто свистами). Их особенность связана с механизмом распространения сверхдлинных волн. При распространении таких

волн в волноводе, образованном нижней границей ионосферы и поверхностью Земли, происходит частичное “просачивание” их через ионосферу. Просочившиеся волны, распространяясь вдоль силовых линий магнитного поля Земли, удаляются от поверхности Земли на десятки тыс. км и затем снова возвращаются к Земле. Скорость их распространения зависит от частоты, высокочастотные составляющие сигнала распространяются с большей скоростью и приходят раньше. Это и приводит к возникновению на выходе приемного устройства характерного свиста, высота тона которого непрерывно меняется.

Характер спектра атмосфериков определяется напряженностью магнитного поля и концентрацией электронов и ионов вдоль траектории; спектр охватывает частоты от сотен Гц до 20–30 кГц. Анализ свойств атмосфериков позволяет установить распределение концентрации электронов до высот в 20–30 тыс. км; с их помощью был обнаружен резкий излом (т.н. колено) в этом распределении на высотах 12–22 тыс. км. На спутниках были обнаружены низкочастотные ветви спектра атмосфериков (ионные атмосферерики) на частотах меньше 400–500 Гц, по которым определяются относительные концентрации ионов и электронов, а также другие параметры ионосферы.

Реализованная на борту МС конфигурация датчиков позволяет провести (05.47.32 UT, район Галапагосских островов) векторные измерения магнитной компоненты (рис. 13а–13в) КНЧ-ОНЧ эмиссий, а также одну компоненту электрического поля E (рис. 13 г).

Одинаковый уровень сигналов по всем трем магнитным компонентам свидетельствует об изотропном распространении волны, хорошая корреляция с электрической компонентой свидетельствует об электромагнитном характере этих волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 25.1.2012 г. с МС *Чибис-М* на околоземной орбите было проведено порядка 2000 сеансов связи, из них около 280 с целью сброса информации с КНА Гроза, общим объемом порядка 12500 Мбайт. Около 70 сеансов связи проведены по заданию иностранных участников проекта (ЛЦ ИКИ НАН и НКА Украины, Университет Этваса, Будапешт, Венгрия) с целью сброса научной информации магнитно-волнового комплекса (МВК) непосредственно на НКУ “Университет Этваса” (~4500 Мбайт).

В конце ноября началась программа скоординированных наблюдений электромагнитных излучений ОНЧ и ВЧ диапазонов на *Чибис-М* и на наземных обсерваториях [34].

В настоящее время идет интенсивная обработка данных и накопление новых, что позволит получить лучшее представление о физических процессах, происходящих в высотных молниевых разрядах.

Со-авторы публикации выражают глубокую благодарность сотрудникам ИКИ РАН, СКБ КП ИКИ РАН, ФИ РАН, НИИЯФ МГУ, ЛЦ ИКИ НАН/ГКА Украины, Университета Этваса, VL-Electronics, ОАО РКК “Энергия”, “НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина”, “ЦУП ЦНИИмаш”, “НИЛАКТ ДОСААФ”, НПОмаш, ООО ИТЦ “СКАНЕКС” за содействие в реализации проекта *Чибис-М*. Особая благодарность российским космонавтам О.Д. Кононенко и А.Н. Шкаплерову за проведенные на борту РС МКС работы по подготовке *Чибис-М* к выводу на автономную орбиту.

Данная работа выполнена при частичной поддержке проектов РФФИ по целевым ориентированным фундаментальным исследованиям “Ионосферные исследования физических механизмов электрических разрядов в атмосфере” (09-05-13587-офиц_ц) и “Новые физические явления при атмосферных грозовых разрядах: наблюдения с микроспутников и земной поверхности” (10-05-93107-НЦНИЛ_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Двайер Д., Смит Д.* Физика атмосферы // В мире науки. 2012. С. 30–35.
2. *Гуревич А.В., Зыбин К.П.* Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // УФН. 2001. Т. 171. С. 1177–1199.
3. *Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre' R.* Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // Phys. Lett. A. 1992. V. 165. P. 463–468.
4. *Gurevich A.V., Duncan L.M., Medvedev Y.V., Zybin K.P.* Radio emission due to simultaneous effect of runaway breakdown and extensive atmospheric showers // Physics Letters A. 2002. V. № 3–4. С. 320–326.
5. *Gurevich A.V., Zybin K.P., Medvedev Y.V.* Amplification and nonlinear modification of runaway breakdown // Phys. Lett. A. 2006. V. 349. P. 331–339.
6. *Panasyuk M.I., et al.* Transient Luminous Event Phenomena and Energetic Particles Impacting the Upper Atmosphere: Russian Space Experiment Programs. Transient luminous event phenomena and energetic particles impacting the upper atmosphere: Russian space experiment programs // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. A00E33. doi:10.1029/2009JA014763.
7. *Klimov S.I., Petrukovich A.A., Zelenyi L.M.* Global monitoring of the electromagnetic parameters of space weather in the frame of the ISS infrastructure // Proceedings 2012 ESA Workshop on Aerospace EMC, Venice, Italy, (ESA SP-702, May 2012)
8. *Klimov S.I., Petrukovich A.A., Zelenyi L.M.* International Experiments Onboard the Russian Segment of the International Space Station in the Frame of the

- Space Weather Program. The International Space Station: Maximizing the returning from extended operations. 15th Annual International Symposium, 15–17 February 2011, Strasbourg, France. Abstracts. International Space University, P. 13–15.
9. Klimov S.I., Korepanov V.E., Grushin V. A. et al. Plasma-wave Studies in the Solar Wind and the Terrestrial Ionosphere. Program for ISU's 16th annual International Symposium "Sustainability of space activities: international issues and potential solutions" ISU Central Campus, Strasbourg, 21–23 February, 2012. , л
 10. Klimov S., Novikov D., Korepanov V. et al. The study of electromagnetic parameters of space weather, microsatellite CHJBIS-M. Small Satellites for Earth Observation. New Developments and Trends/ Rainer Sandau, Hans-Peter Röser, Arnaldo Valenzuela (Eds.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010. P. 95–102.
 11. Klimov S., Zelenyj L., Novikov D. et al. Plasma – Wave Processes Manifestation in the Ionosphere and the Space Weather Parameters; Overview of the "Chibis-M". Thunderstorms and Elementary Particles Acceleration TERA'2010. International Conference Center, Nor Amberd, Armenia, September 6–11, 2010, Programme and Abstracts, P. 41–42.
 12. Корепанов В.Е., Марусенков А.А., Беляев С.М. и др. Хвильовий експеримент на мікросупутнику "Чібіс-М" // Космічна наука і технологія. 2010. Т. 16. № 3. С. 69–77.
 13. Zelenyi L.M. et al. Micro-satellite "Chibis" – universal platform for development of methods of space monitoring of potentially dangerous and catastrophic phenomena. Selected Proceedings of the 5th International Symposium of the International Academy of Astronautics, Berlin, April 4–8, 2005 / Edited by Hans-Peter Roeser, Rainer Sandau, Arnaldo Valenzuela. Walter de Gruyter, Berlin, New York, P. 443–451, 2005.
 14. Гуревич А.В., Зелёный Л.М., Климов С.И. Научные задачи миссии "Чибис-М". Миссия "Чибис-М". Сборник трудов выездного семинара, серия "Механика, управление и информатика" / Под ред. Назирова Р.Р. М.: ИКИ РАН, 2009, С. 7–26. <http://www.cosmos.ru/books/2009chibis-m.pdf>
 15. Гуревич А.В., Зелёный Л.М., Климов С.И. Космическая миссия "Чибис-М" // Экология и жизнь. 2011. Т. 7. С. 50–56.
 16. Миссия "Чибис-М". Сборник трудов выездного семинара, серия "Механика, управление и информатика" / Под ред. Назирова Р.Р. М.: ИКИ РАН, 2009. <http://www.cosmos.ru/books/2009chibis-m.pdf>
 17. Климов С.И., Зелёный Л.М., Ангаров В.Н. и др. Академический микроспутник "Чибис-М" (КЭ "Микроспутник" на РС МКС). VI Международный специализированный симпозиум "Космос и глобальная безопасность человечества". Сборник тезисов и программа. Евпатория, Украина, 3–7 сентября 2012, С. 101–103.
 18. Гарипов Г.К., Свертилов С.И., Яшин И.В. Физические характеристики и алгоритмы выработки триггеров прибором РГД. Миссия "Чибис-М" // Сборник трудов выездного семинара, серия "Механика, управление и информатика" / Под ред. Назирова Р.Р. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 49–58. <http://www.cosmos.ru/books/2009chibis-m.pdf>
 19. Цирлин Ю.А., Глобус М.Е., Сысоева Е.П. Оптимизация детектирования гамма-излучения сцинтилляционными кристаллами. М.: Энергоатомиздат, 1991.
 20. Гарипов Г.К., Свертилов С.И., Яшин И.В. Физические характеристики и алгоритмы выработки триггеров прибором ДУФ. Миссия "Чибис-М". Сборник трудов выездного семинара, серия "Механика, управление и информатика" / Под ред. Назирова Р.Р. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 58–63. <http://www.cosmos.ru/books/2009chibis-m.pdf>
 21. Готлиб В.М., Каредин В.Н., Тоньшев А.К., Гаретов В.Ю. Радиочастотный анализатор-регистратор молниевой ктивности для микроспутника "Чибис-М". Миссия "Чибис-М" // Сборник трудов выездного семинара, серия "Механика, управление и информатика" / Под ред. Назирова Р.Р. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 72–78. <http://www.cosmos.ru/books/2009chibis-m.pdf>
 22. Бондаренко А.В., Докучаев И.В., Котцов В.А. Цифровая фотокамера для регистрации атмосферных грозных разрядов // Сборник трудов выездного семинара, серия "Механика, управление и информатика" / Под ред. Назирова Р.Р. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 63–71. <http://www.cosmos.ru/books/2009chibis-m.pdf>
 23. Новиков Д.И., Климов С.И., Корепанов В.Е. и др. Магнитно-волновой комплекс микроспутника "Чибис-М" для изучения электромагнитных параметров космической погоды // Сборник трудов выездного семинара, серия "Механика, управление и информатика" / Под ред. Назирова Р.Р. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 78–89. <http://www.cosmos.ru/books/2009chibis-m.pdf>
 24. Ангаров В.Н., Козлов В.М., Новиков А.А. и др. Блок накопления данных для КНА "Гроза" // Сборник трудов выездного семинара, серия "Механика, управление и информатика" / Под ред. Назирова Р.Р. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 90–97. <http://www.cosmos.ru/books/2009chibis-m.pdf>
 25. Готлиб В.М., Каредин В.Н., Скородумов В.Н., Бруква Н.Н. Радиоканал передачи научных данных микроспутника "Чибис-М" // Сборник трудов выездного семинара, серия "Механика, управление и информатика" / Под ред. Назирова Р.Р. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 101–106. <http://www.cosmos.ru/books/2009chibis-m.pdf>
 26. Климов С.И. Перспективы микроспутников. Фундаментальные космические исследования и мониторинг потенциально опасных и катастрофических явлений с использованием небольших КА // Российский космос. 2008. № 6(30). С. 28–34.
 27. Зелёный Л.М., Гуревич А.В., Климов С.И. и др. Академический микроспутник "Чибис-М" (Космический эксперимент "Микроспутник" на Российском сегменте Международной космической станции). Пр-2166. ИКИРАН. Москва. 2012. С. 23.
 28. Зелёный Л.М., Ангаров В.Н., Добрян М.Б. и др. Исследования физических процессов при высотных атмосферных грозных разрядах. Академический микроспутник "Чибис-М". VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству, 24–28 сентября 2012 г., Санкт-Петербург: Сборник трудов, С. 81.

29. Hayakawa M., Iudin D.I., Trakhtengerts V.Yu. Modeling of thundercloud VHF/UHF radiation on the lightning preliminary breakdown stage // J. Atm. Sol. Terr. Phys. 2008. V. 70. P. 1660–1668. doi: 10.1016/j.jastp.2008.06.011.
30. Milovanov A.V., Zelenyi L.M., Zimbardo G., Veltri P. Self-organized branching of magnetotail current systems near the percolation threshold // JGR, 106, P. 6291–6308, doi: 10.1029/1999JA000446, 2001.
31. Klimov S.I., Korepanov V.E., Grushin V.A. et al. Plasma-wave Studies in the Solar Wind and the Terrestrial Ionosphere // Program for ISU's 16th annual International Symposium "Sustainability of space activities: international issues and potential solutions" ISU Central Campus, Strasbourg, 21–23 February, 2012.
32. Klimov S.I., Petrukovich A.A., Zelenyi L.M. International Experiments Onboard the Russian Segment of the International Space Station in the Frame of the Space Weather Program. The International Space Station: Maximizing the returning from extended operations // 15th Annual International Symposium, 15–17 February 2011, Strasbourg, France. Abstracts. International Space University. P. 13–15.
33. Klimov S.I., Petrukovich A.A., Zelenyi L.M. Global monitoring of the electromagnetic parameters of space weather in the frame of the ISS infrastructure // Proceedings '2012 ESA Workshop on Aerospace EMC', Venice, Italy, ESA SP-702, May 2012.
34. Klimov S., Belyakova L., Pincon J.-L., Sauvaud J.-A. New physical phenomena in the atmospheric lightning discharges: observations from micro-satellites and ground. The International Workshop on the Shocks, Turbulence and Nonlinear Systems joint with The International Advanced Workshop on the Seismo-Electromagnetic Studies. Programme and Abstracts, 11–15 September, 2011, Eilat, Israel. 2011, P. 24. http://spacescience.group.shef.ac.uk/Eilat_2011/index.html