

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ И ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. ПЕТРУКОВИЧ, О. В. НИКИФОРОВ

*Институт космических исследований Российской академии наук,  
117342, Москва, Россия  
E-mail: apetruko@iki.rssi.ru, gelokin2201@gmail.com*

Рассмотрены особенности развития микро- и наноспутников, предназначенных для изучения солнечно-земных связей. Приведены рекомендации, выработанные на специальной научной сессии Секции солнечно-земных связей Совета по космосу РАН „Научные задачи экспериментов по исследованию солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках“, проведенной с целью определения актуальных научных задач и возможности их решения с помощью малых КА, а также развития взаимосвязей между разработчиками спутников и их производителей. Разработка малых КА должна дополнить „большую“ космическую программу России. Рассмотрены зарубежные наноспутники стандарта CubeSat, работа над которыми активно ведется ведущими учебными заведениями мира, а основными спонсорами являются NASA и NSF. Предложены подходы к формированию приоритетных научных задач для развития наноспутников. Обсуждены перспективы разработки CubeSat в России.

**Ключевые слова:** *CubeSat, наноспутники, микроспутники, солнечно-земные связи, околоземная плазма, ионосфера, магнитосфера*

Малые КА — микро- (до 50 кг), нано- (до 10 кг) и пикоспутники (до 1 кг) — бурно развивающийся класс аппаратов. Благодаря своим особенностям такие спутники могут полностью изготавливаться различными научными и учебными организациями, что обеспечивает жесткую конкуренцию научных и технических идей и возможностей. В настоящее время в мире в стадии подготовки и реализации находятся несколько десятков проектов только по солнечно-земной тематике. Однако из-за малости размеров спутников и ограничений по орбитам выбор действительно актуальных научных задач для таких проектов затруднен. Реализация только некоторых проектов обеспечит получение новых знаний об ионосфере и солнечно-земных связях.

В России развитие этого направления только начинается, тем не менее в последние годы на орбите находилось несколько российских „научно-образовательных“ микроспутников. Основная российская научная космическая программа (ФКП) ориентирована на достаточно редкие крупные проекты. В этой связи возможность постановки относительно быстрых и малозатратных научных экспериментов на малых КА, в том числе являющихся частью инициативных программ вузов, НИИ, предприятий, достаточно привлекательна. Наряду с существенным увеличением числа запусков это сделает возможным оперативное решение отдельных актуальных задач, тестирование приборов и методик, приведет к общему „оживлению“ научной космической деятельности.

Для активизации деятельности по данному направлению 3 декабря 2014 г. в ИКИ РАН была проведена специальная научная сессия Секции солнечно-земных связей Совета по космосу РАН „Научные задачи экспериментов по исследованию солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках“. Цель сессии — определить актуальные научные задачи и возможности их решения с помощью малых КА, позволяющих дополнить „большую“

космическую программу РФ, способствовать развитию связей между разработчиками и изготовителями спутников [1].

Большинство предложений относилось к спутникам класса 50—100 кг (вес научной аппаратуры 5—20 кг). Была приведена информация по реализуемым проектам „Кондор“ и „Чибис-АИ“. Представленные материалы свидетельствуют, что российскими организациями накоплен достаточный опыт в разработке научных приборов и служебных систем таких КА. При изготовлении бортовой аппаратуры для малых КА используются традиционные технические подходы. Стоимость таких проектов оценивается в 50—100 млн руб. в ценах начала 2014 г.

Было предложено также решать задачи:

- 1) исследования тонкой структуры и мелкомасштабной электродинамики авроральных форм, наблюдаемых в эмиссиях видимого диапазона;
- 2) инверсной радиотомографии ионосферы;
- 3) изображающей рентгеновской спектрометрии солнечных вспышек;
- 4) радиационного мониторинга внутренней магнитосферы;
- 5) многоточечных исследований внешней магнитосферы;
- 6) исследований состава плазмы ионосферы.

Эти направления могут быть рекомендованы для проработки с целью дальнейшего использования на имеющихся спутниковых платформах.

Научные задачи и прототипы научной аппаратуры для спутников нанокласса существенно менее проработаны и носят единичный характер. Это связано, в первую очередь, с отсутствием опыта работы у отечественных специалистов в данном сегменте. Однако за рубежом этот сегмент стремительно развивается в основном в формате CubeSat.

Появление наноспутников CubeSat в начале 2000-х гг. в значительной степени обязано миниатюризации вычислительной техники, а также сопутствующему ей значительному уменьшению потребления энергии. Профессор J. Puig-Suari (California Polytechnic State University, США) и профессор В. Twiggs (StanfordUniversity's Space Systems Development Laboratory) для активного привлечения молодых специалистов к разработке космической техники создали стандарт сверхмалого КА: CubeSat размером 10×10×10 см и массой чуть более 1 кг (1U). В работе [2], посвященной CubeSat Design Specification (CDS) REV 13, регламентируются в основном массогабаритные характеристики, крепления, необходимые для запуска. NASA сформулировала требования по тестированию [3] и др. Были также установлены ориентиры по времени разработки спутников (не более 1—3 лет) и стоимости — не более 50 000 долларов США.

К настоящему времени запущено более 270 спутников CubeSat, и если с 2000 по 2005 год запускалось от трех до восьми, то в 2006—2012 гг. — в среднем по 20 в год, начиная с 2013 года запускается около 80 аппаратов в год.

Декларированные цели большинства запусков — учебные или технологические: отработка конструкций, тестирование оборудования и т.п. Научные задачи стоят в лучшем случае на третьем месте, что не удивительно, так как размещение значимой научной аппаратуры в таком объеме является непростой задачей. Довольно много аппаратов не выполнили своей миссии, что в значительной мере связано с отсутствием стандартов основных бортовых систем, а также опыта разработки и низкой квалификацией исполнителей.

С 2003 по конец 2015 г. было запущено чуть менее 20 аппаратов, одной из целей которых было заявлено изучение солнечно-земных процессов и ионосферы. География центров проектирования, создания и запуска таких CubeSat включает California Polytechnic State University, San Luis Obispo, Utah State University, Goddard Space Flight Center, University of California, Morehead State University, University of Colorado at Boulder, Montana State University,

а также несколько европейских и азиатских учебных заведений. Активную финансовую поддержку данного направления с самого начала ведут NASA и NSF.

Наиболее интересными проектами стали CubeSat RAX-2 [4], DICE [5], CINEMA [6], CSSWE [7], FIREBIRD-II [8].

В октябре 2011 г. был запущен RAX-2 формата 3U. Проект реализован совместными усилиями команд University of Michigan и SRI International при финансовой поддержке NSF. Задачей RAX стало изучение ионосферной турбулентности посредством приема на нем рассеянного сигнала наземных УВЧ-радаров. На сайте проекта <<http://rax.sri.com>> представлены более подробная информация и научные данные, полученные спутником.

С целью изучения вариаций плотности плазмы в ионосфере был запущен спутник DICE. Проект реализован под руководством NASA Goddard Space Flight Center. Одновременно два CubeSat 1,5U несли одиночные зонды Ленгмюра для измерения плотности плазмы и электрическую антенну для измерения постоянного и переменного электрического поля. К сожалению, в настоящее время сайт проекта недоступен, но подробную информацию по DICE можно получить на сайте <<https://eoportal.org>>.

Участниками проекта CINEMA были ведущее учреждение University of California, Berkeley/Space Sciences Laboratory (США), а также Imperial College London (Великобритания); Kyung Hee University (Южная Корея); NASA/ARC (США). Научной целью проекта было объявлено обеспечение критических измерений „космической погоды“. Для этого в CubeSat 3U были помещены магнитометр и комбинированный датчик сверхтепловых электронов, ионов и нейтральных частиц. Запуск состоялся 13 сентября 2012 года, в настоящее время спутник не активен. Более подробную информацию можно найти на сайте проекта <<http://sprg.ssl.berkeley.edu/cinema/>>.

Весьма успешным можно считать проект CSSWE Университета Колорадо. Его цель — изучение космической погоды с помощью спектрометра высокоэнергичных электронов радиационных поясов Земли и солнечных протонов. Для этого был создан спутник формата 3U. Запуск состоялся 7 марта 2013 г., и после этого связь с ним была потеряна на 103 дня. Затем связь была восстановлена и спутник передавал научные данные в течение 155 дней. Собранные научные данные доступны на сайте проекта <<http://lasp.colorado.edu/home/csswe/data/>>.

Проект FIREBIRD разработан университетами штата Монтана и Нью-Гэмпшир при участии The Aerospace Corporation и Alamos National Laboratories. На CubeSat 1,5U был установлен прибор FIRE, предназначенный для регистрации релятивистских электронов в диапазоне энергий от 0,25 до ~1 МэВ. Проект FIREBIRD-I (два идентичных спутника) был запущен в 2013 г., но оказался не очень удачным. FIREBIRD-II (также два спутника) был запущен 31.01.2015 и функционирует до сих пор. Данные, получаемые со спутника, доступны по запросу <<https://ssel.montana.edu/firebird2.html>>.

В настоящее время по тематике космической плазмы готовятся к запуску более 10 аппаратов, в частности SpaceBuoy, RBLE, CubeSTAR, LAICE и др.

Сегмент наноспутников стандарта CubeSat представляется наиболее перспективным в классе сверхмалых КА с точки зрения оптимизации показателя цена/качество. Однако для успешного применения их для научных исследований необходима более тщательная проработка научных задач, включая проведение измерений в „малом формате“.

Можно рассмотреть два подхода к формированию научных задач CubeSat:

- поиск задач, которые могут быть решены только на КА такого формата;
- выбор полезной нагрузки, миниатюризация которой возможна без существенной потери качества и количества измерений, имеющих научную новизну.

В любом случае необходимо учитывать, что уменьшение размера научных приборов ведет к снижению их чувствительности, детальности и точности измерений, а служебные

системы CubeSat имеют существенные ограничения в части обеспечения передачи данных, точности ориентации и пр.

Анализ выполненных экспериментов по исследованию околоземной плазмы, а также современного состояния науки об ионосфере и солнечно-земных связях позволяет утверждать, что на CubeSat целесообразно проводить, в частности:

1) эксперименты по дистанционной диагностике плазмы методами радиопросвечивания с использованием спутниковых навигационных сигналов, наземных специализированных радиопередатчиков. В таком случае на борт должен быть установлен двухчастотный приемник навигационного сигнала или радиосигнала в диапазоне от десятков до сотен мегагерц;

2) эксперименты по измерению быстрых вариаций плотности и электрических флуктуаций плазмы при различных геомагнитных условиях и в различных широтных зонах, в том числе на малых высотах. В этом случае на борт должен быть установлен миниатюрный плазменный зонд: одиночный или двойной зонд Ленгмюра.

В настоящее время эта тематика в „больших“ проектах практически отсутствует или не может быть реализована в принципе (на малых высотах). Тем не менее несомненна актуальность изучения распространения радиосигналов, влияния геомагнитных и геоэлектрических вариаций на технические системы.

Минимальным форматом КА, в котором возможно размещение подобных приборов и сопутствующей служебной аппаратуры, является, по всей видимости, 2U—3U. В CubeSat 1U может поместиться только самый простой прибор, а возможности „поддержки“ эксперимента со стороны служебных систем (электропитание, радиоканал) будут сильно ограничены. Наиболее предпочтительной орбитой для плазменных экспериментов является солнечно-синхронная (для обзора всех возможных геомагнитных широт) с постепенным понижением высоты орбиты до предельно малой (200—400 км). Такое снижение необходимо для выполнения измерений в наиболее активной и плотной части ионосферы, не посещаемой космическими аппаратами из-за малого срока баллистического существования на таких орбитах.

Определить научные цели ближайших российских проектов можно, выполнив испытательный запуск. Основными целями может стать отладка необходимых служебных систем, определение реального объема получаемой информации с учетом всех ограничений, определение точности измерений. Такой запуск возможен и на орбиту МКС.

В России работы по тематике CubeSat должны вестись в основном в вузах и научных организациях, в значительной степени силами аспирантов и студентов с доминирующим вкладом привлеченного финансирования. Необходимо создать условия, в том числе соответствующую нормативную базу, для быстрой разработки и запуска таких КА (в течение не более трех лет).

С целью повышения научной отдачи наноспутников CubeSat целесообразно координировать выбор научных задач проектов, в том числе провести разработку стандартных комплектов научной аппаратуры. Эту функцию в России могут выполнять профильные институты РАН. Кроме того, ведение параллельных разработок во многих различных организациях приводит к дублированию (станций приема и управления, наземной испытательной базы). Координация и стандартизация в этом вопросе позволили бы существенно увеличить общую эффективность развития малого космоса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрукович А. А. Исследования солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках // Матер. науч. сессии Секции солнечно-земных связей Совета по космосу Российской академии наук. Москва, 2015 [Электронный ресурс]: <<http://iki.cosmos.ru/books/2015petrukovich.pdf>>.
2. CubeSat Coordinator Developers. CubeSat Design Specification. Cal Poly State University, 2015 [Электронный ресурс]: <[http://www.cubesat.org/images/developers/cds\\_rev13\\_final2.pdf](http://www.cubesat.org/images/developers/cds_rev13_final2.pdf)>.
3. Kalpana Sh. GSFC Documents // Standarts and Technical Assistance Resource Tool. NASA Official [Электронный ресурс]: <<https://standards.nasa.gov/documents/gsfsc>>.
4. Bahcivan H. Mission science // Radio Aurora Explorer. SRI International [Электронный ресурс]: <<http://rax.sri.com/raxmission.html>>.
5. DICE // eoPortal. ESA [Электронный ресурс]: <<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/dice>>.
6. Montana State University FIREBIRD II [Электронный ресурс]: <<https://ssel.montana.edu/firebird2.html>>.
7. UC Berkeley CINEMA at UC Berkeley [Электронный ресурс]: <<http://sprg.ssl.berkeley.edu/cinema/default.html>>.
8. University of Colorado Boulder Overview // CSSWE [Электронный ресурс]: <<http://laspl.colorado.edu/home/csswe/overview/>>.

**Сведения об авторах**

- Анатолий Алексеевич Петрукович** — д-р физ.-мат. наук, член-корр. РАН; Институт космических исследований РАН, отдел физики космической плазмы; заведующий отделом; E-mail: [apetruko@iki.rssi.ru](mailto:apetruko@iki.rssi.ru)
- Олег Вячеславович Никифоров** — Институт космических исследований РАН, отдел физики космической плазмы; ведущий инженер; Геофизический центр Российской академии наук, сектор инновационных проектов; старший научный сотрудник; E-mail: [gelokin2201@gmail.com](mailto:gelokin2201@gmail.com)

Рекомендована межвузовской  
кафедрой космических исследований

Поступила в редакцию  
14.11.2015 г.

**Ссылка для цитирования:** Петрукович А. А., Никифоров О. В. Исследование солнечно-земных связей и околоземной плазмы с помощью малых космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 6. С. 429—434.

**INVESTIGATION OF SOLAR-TERRESTRIAL CONNECTION AND NEAR-EARTH PLASMA  
WITH THE USE OF SMALL SPACECRAFTS**

**A. A. Petrukovich, O. V. Nikiforov**

*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
117342, Moscow, Russia*

*E-mail: [apetruko@iki.rssi.ru](mailto:apetruko@iki.rssi.ru), [gelokin2201@gmail.com](mailto:gelokin2201@gmail.com)*

Development of micro and nanosatellites aimed at solar-terrestrial connection research is considered. Recommendations formulated at special scientific session of Space Council of the Russian Academy of sciences devoted to possibilities of solar-terrestrial research using micro-, nano- and picosatellites and discussion of expanded cooperation between small spacecraft designers and manufacturers are presented. The feasibility of competitive scientific priorities for small spacecraft is emphasized as an important complement to Russian Federal Space Program. A review of relevant foreign CubeSat projects is carried out. General requirements and approaches to problems of small satellites research and development are formulated and several examples are analyzed. Ways to improve CubeSat development in Russia are proposed.

**Keywords:** CubeSat, nanosatellites, microsatellites, solar-terrestrial connection, near-Earth plasma, ionosphere, magnetosphere

**Data on authors**

**Anatoly A. Petrukovich**

— Dr. Sci., Corr. Member of the RAS; Space Research Institute of the RAS, Department of Space Plasma Physics; Head of the Department; E-mail: [apetruko@iki.rssi.ru](mailto:apetruko@iki.rssi.ru)

**Oleg V. Nikiforov**— Space Research Institute of the RAS, Geophysical Center of the RAS, Sector of Innovation Projects; Senior Scientist;  
E-mail: gelokin2201@gmail.com**For citation:** *Petrukovich A. A., Nikiforov O. V.* Investigation of solar-terrestrial connection and near-Earth plasma with the use of small spacecrafts // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 6. P. 429—434 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-429-434