

УДК 629.785

Малые спутники для космических исследований

А. А. Петрукович¹, О. В. Никифоров

¹член-корр. РАН, д. ф.-м. н.

ФГБУН Институт космических исследований РАН

e-mail: a.petrukovich@cosmos.ru, gelokin2201@gmail.com

Аннотация. Рассмотрен мировой опыт запуска научных спутников для исследований плазмы магнитосферы и ионосферы с акцентом на применение малых спутников. Для исследований магнитосферы применяются в основном спутники массой 100–1000 кг. На низкой околоземной орбите (удобной для ионосферных исследований) в последние годы доминируют микро- и наноспутники. В статье представлены перспективные задачи для микро- и наноспутников на различных орбитах, подходы к оценке их эффективности. Обсуждены общие проблемы развития данного направления и возможности их решения в современных условиях как в целом, так и для российского космоса.

Ключевые слова: магнитосфера, ионосфера, солнечный ветер, микроспутник, наноспутник, кубсат

Small Satellites for Scientific Research

A. A. Petrukovich¹, O. V. Nikiforov

¹Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, doctor of physics and mathematics
Space Research Institute of the Russian Academy of Science

e-mail: a.petrukovich@cosmos.ru, gelokin2201@gmail.com

Abstract. This article reports on the international experience of scientific satellite launches for magnetosphere and ionosphere plasma research with an emphasis on the use of small satellites. For magnetospheric studies, satellites weighting 100–1000 kg are mainly used. In low Earth orbit (convenient for ionospheric studies) micro- and nanosatellites have dominated in the recent years. The paper formulates scientific objectives for the future micro- and nanosatellites in various orbits, as well as approaches to the assessment of their effectiveness. The paper discusses the common problems of this development field and their possible solutions, both as a whole and for the Russian space program in particular.

Keywords: magnetosphere, ionosphere, solar wind, microsatellite, nanosatellite, CubeSat

Введение

В последние годы активно обсуждается тенденция снижения массы автоматических космических аппаратов, выражающаяся, в том числе, в применении малых форматов КА: мини- (менее 500 кг), микро- (менее 100 кг) и наноспутников (менее 10 кг) (см., например, [1]). С одной стороны, действительно, прогресс в миниатюризации позволяет значительно снизить массу отдельных составных частей и, как следствие, массу всего КА. Однако, с другой стороны, растут и требования к функциональности полезной нагрузки (например, по количеству и пропускной способности каналов связи), имеются также чисто физические ограничения (например, чувствительность антенн и телескопов зависит от их размера). Таким образом, проблематику снижения массы целесообразно рассматривать независимо в различных целевых сегментах автоматических КА. Средняя масса, например, геостационарных КА в реальности имеет тенденцию к увеличению [2].

В случае своего применения малые спутники не заменяют собой большие, они, скорее, заполняют свободные ниши в спектре прикладных и фундаментальных задач, недоступные «обычным» КА по техническим или финансовым причинам. Немаловажным фактором является относительная быстрота реализации малых проектов, позволяющая оперативно реагировать на изменения научных приоритетов. В результате число выводимых в космос объектов увеличивается, а круг участников космической деятельности расширяется за счет научных и образовательных организаций, малых компаний, которые самостоятельно изготавливают или финансируют микро- и наноспутники.

В данной статье остановимся на рассмотрении возможностей применения спутников малого формата для исследований магнитосферы и ионосферы Земли, солнечно-земных связей. Такие космические аппараты выводятся либо на низкие околоземные (высотой 500–1000 км, для исследований ионосферы), либо на высокоапогейные орбиты (для изучения магнитосферы и солнечного ветра). На спутниках устанавливается комплекс научной аппаратуры из 5–15 достаточно малогабаритных (обычно до 10 кг) приборов, измеряющих электро-

магнитные колебания в диапазоне частот от постоянных полей до мегагерц и потоки электронов и ионов плазмы. Эти спутники достаточно многочисленны (с 1975 г. запущено более 50 единиц), а требования, предъявляемые к их техническим параметрам со стороны целевой аппаратуры, достаточно стабильны.

На рис. 1 представлены массы таких КА в зависимости от года запуска для ионосферных (на низкой орбите) и магнитосферных (на высокоапогейной орбите) исследований. Масса высокоапогейных спутников на протяжении последних 30–40 лет достаточно стабильна, в диапазоне от более 100 до 1000 кг. Тенденцию к уменьшению массы проявляет только статистика для ионосферных спутников, в основном в связи с появлением спутников микрокласса после 1990 г. (наноспутники-«кубсаты» сюда не включены). Интересно, что линейная регрессия массы ионосферного спутника в зависимости от года предсказывает достижение нулевой массы около 2013–2015 гг. По совпадению именно в это время был зарегистрирован взрывной рост количества запусков кубсатов (то есть спутников почти нулевой массы в классической шкале).

Формат кубсатов был предложен в 2000 г. как стандарт относительно дешевых любительских спутников, собранных из кубиков с гранью 10 см

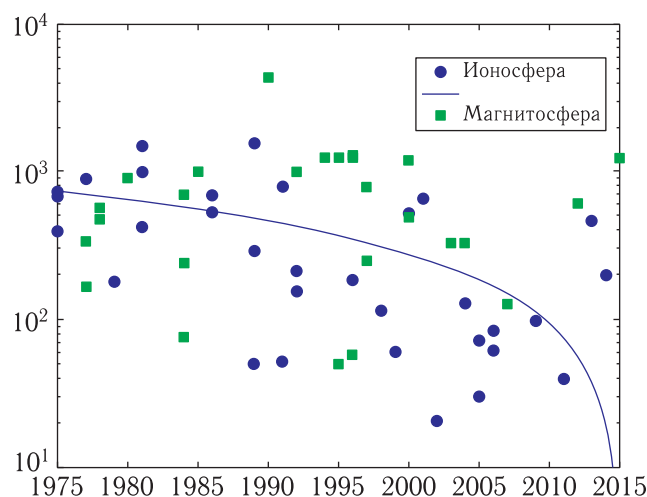


Рис. 1. Статистика масс спутников для магнитосферных и ионосферных исследований в зависимости от даты запуска. Вертикальная ось показывает массы в кг, в логарифмическом масштабе. Синяя кривая показывает линейную регрессию по массе для ионосферных спутников

и весом порядка 1 кг (1U) [4]. Были также установлены ориентиры по времени разработки спутников (не более 1–3 лет) и стоимостная планка — не более 50 000 долл. США за стандартный спутник 1U. Кубсаты наиболее активно начали развиваться после 2010 г., когда стало ясно, что в «литровом» объеме можно разместить и служебные системы, и целевую аппаратуру с достаточно серьезными характеристиками, а на рынке появилось множество предложений стандартных бортовых систем.

Вопрос о применении кубсатов важен и в связи с тем, что этот формат имеет многие признаки прорывной технологии. Микроспутники, несмотря на снижение массы, остались в целом достаточно сложными объектами и единичной продукцией, аналогично своим более крупным собратьям. Взрывной рост количества спутников и числа участников космической деятельности начался именно при переходе к наноформату. Сейчас количество запусков кубсатов в год достигает сотни, в том числе уже начат запуск коммерческих группировок кубсатов (например, спутники Dove компании Planet Labs).

Примером заинтересованности космических агентств являются и соответствующие программы NASA и других государственных структур США [5]. NASA ведет программы технологической поддержки и обеспечивает бесплатные запуски. Научные центры NASA имеют собственные планы создания кубсатов. Национальный научный фонд NSF в рамках специальной программы поддерживал уже около 15 проектов кубсатов с четкими научными задачами. В результате после 2015 г. года кубсаты начинают преобладать в ионосферных исследованиях по количеству запусков.

Рассмотрим далее вопросы влияния массы КА на выбор целевых задач в области магнитосферных и ионосферных исследований, а также подходы к оценке эффективности проектов с акцентом на микро- и наноспутники, обсудим их возможную роль в российской космической программе. Для рассмотрения научных задач микро- и наноКА в декабре 2014 г. в ИКИ РАН была проведена специальная научная сессия Секции солнечно-земных связей Совета РАН по космосу [3], часть выводов которой представлена и в данном материале.

Высокоапогейные спутники

Задачи исследований магнитосферы Земли и солнечного ветра устойчиво привлекают внимание различных стран в течение всей космической эры. Это связано как с важностью этой зоны как части системы солнечно-земных связей [6], так и с удобной возможностью изучения фундаментальных механизмов самоорганизации бесстолкновительной плазмы, характерной для широкого круга астрономических объектов, но недоступной в земной лаборатории. За последние 30–40 лет в России, США, Европе, Китае и Японии были запущены несколько десятков таких спутников (проекты ISEE, AMPTE, «Прогноз», «Интербол», Geotail, Wind, Polar, Cluster, Double Star, THEMIS, MMS), имевших на борту от нескольких десятков до нескольких сотен килограммов научной аппаратуры. Такие проекты являются комплексными по задачам, обеспечивая получение приоритетной научной информации на всех участках орбиты, во всех (или почти во всех) посещаемых зонах магнитосферы и солнечного ветра.

Приведем несколько примеров (рис. 2). Пять спутников THEMIS (масса одного КА — 128 кг) были запущены в 2007 г. [7]. Эти спутники были реализованы на уже имевшейся у американских коллег малой платформе SMEX и имели на борту достаточно простой набор из пяти стандартных приборов. Новизна научных результатов проекта достигалась в данном случае проведением одновременных измерений на уникальной комбинации пяти орбит. Четыре спутника MMS (масса одного КА — более 1200 кг) были запущены в 2015 г. [8]. Новизна этого проекта, в отличие от предыдущего, заключалась именно в качестве приборов. Спутник на порядок большей массы вместил в себя почти в десять раз больше различных детекторов (по сравнению со спутником THEMIS), позволив радикально, почти в сто раз, улучшить чувствительность и временное разрешение проводимых наблюдений.

Таким образом, масса высокоапогейного спутника для плазменных исследований определяется прежде всего требуемой степенью детализации и широтой набора проводимых измерений. Миниспутники использовались достаточно часто, но дальнейшее уменьшение массы возможно

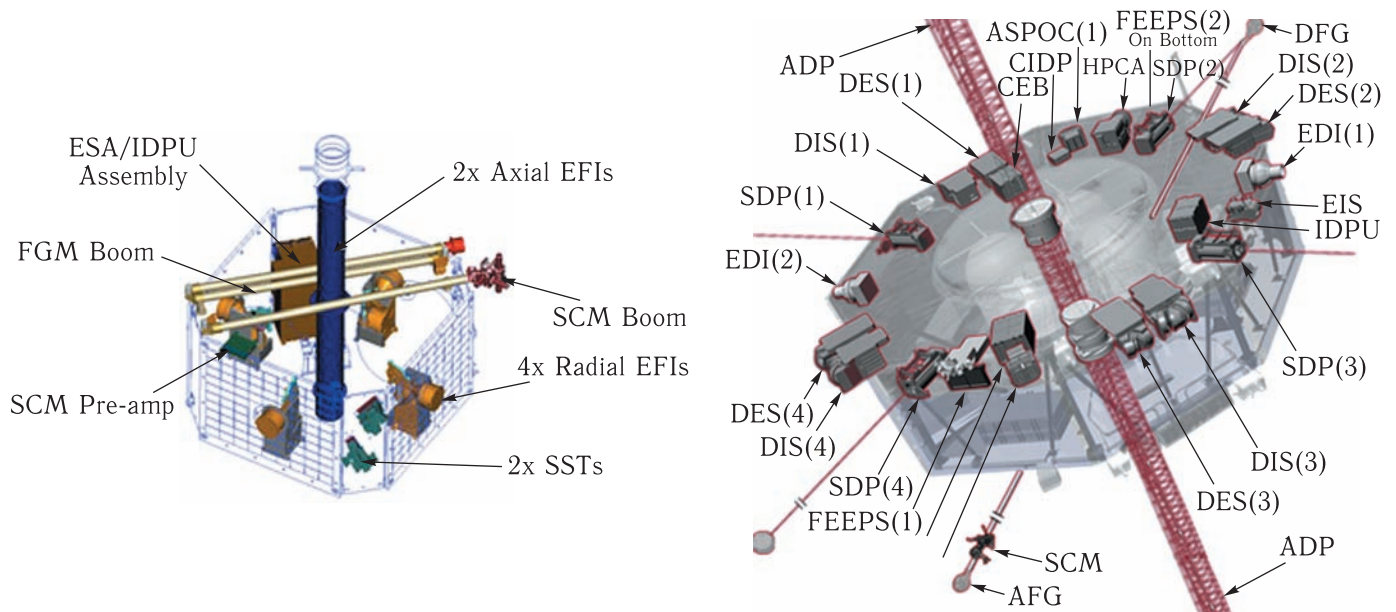


Рис. 2. Схема приборного состава космических аппаратов THEMIS (слева) и MMS (справа). Иллюстрации с сайта NASA. Стрелками показаны установленные приборы и приведены их обозначения

только при решении каких-то более узких конкретных задач. Как показывает опыт, на спутниках класса менее 50–100 кг современный комплексный эксперимент по исследованию плазмы с измерением более или менее полного набора параметров плазмы реализовать уже практически невозможно как в силу лимита массы для научной аппаратуры, так и в связи с рядом ограничений технического характера, например из-за недостатка пропускной способности радиоканала с Землей.

Микроспутники с научной аппаратурой для исследований плазмы запускались на высокоапогейные орбиты в роли субспутников, то есть небольших спутников, находящихся на некотором отдалении от основного, более крупного КА («Магистр-4» в проекте «Интербол [9], AMPTE-UKS в проекте AMPTE [10]) (рис. 3). На них были установлены достаточно простые датчики электрического и магнитного полей, датчики ионов и электронов, они управлялись независимо от основного спутника и поддерживали расстояние до него порядка сотен и тысяч километров. Субспутник в данной схеме выполняет роль «летающего прибора» по измерению только необходимой части параметров в дополнительной точке пространства, что обеспечивает получение информации о пространственных структурах,

невозможное при использовании только одного спутника.

В этой связи использование микро- или наноспутника именно в роли субспутника, сопровождающего основной космический аппарат, представляется наиболее перспективным и в будущих проектах [11]. При такой схеме решается значительная часть технических трудностей применения такого КА на высокоапогейной орбите: он может быть выведен на орбиту вместе с основным спутником, при этом основной спутник может использоваться для передачи информации как ретранслятор. С учетом развития технологий миниатюризации вероятно можно уменьшить массу субспутника до величины 20–30 кг. Более того, после запуска четверок и пятерок космических аппаратов (Cluster, THEMIS, MMS) в ближайшие десятилетия появятся проекты, предусматривающие одновременное развертывание 12–36 спутников. Применение микро- и наноспутников в таких системах становится неизбежным, имея в виду ограничения как технического, так и финансового характера.

Опыт использования кубсатов для плазменных исследований на высокоапогейных орбитах в настоящее время практически отсутствует. Однако ясно, что количество детекторов, которые можно разместить на такой платформе, крайне ограничено.

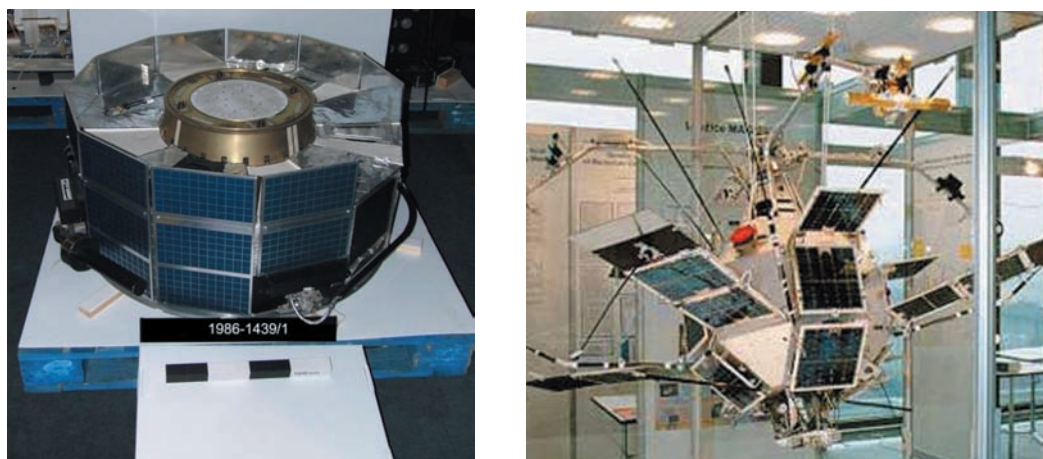


Рис. 3. Субспутники AMPTE-UKS (слева) и «Магион-4» (справа)

Возможно, они будут применяться как субспутники на очень малых расстояниях порядка единиц километров от основного КА [11], что позволит сократить число необходимых приборов до одного-двух, измеряющих наиболее изменяющиеся параметры.

Еще одна возможная задача для микроспутника — это мониторинг солнечного ветра в интересах прогноза геомагнитной активности с орбиты в передней солнечно-земной точке либрации (примерно 1,5 млн км от Земли) [12]. В настоящее время в точке либрации находятся космические аппараты США, но их масса приближается к 1000 кг. В то же время минимальный набор приборов для мониторинга солнечного ветра весит 5–20 кг, а его энергопотребление составляет 10–20 Вт. Количество топлива при использовании в ходе вывода в точку либрации гравитационного маневра у Луны также невелико (требуемое ΔV — около 100 м/с). Таким образом, адекватная масса спутника для такой задачи не более 100 кг, а его попутный запуск может быть выполнен в рамках лунной программы. Реализация такого проекта могла бы стать не только важным элементом обеспечения независимости России в части данных о гелиогеофизической обстановке, но и существенным шагом в развитии космических технологий.

Ионосферные спутники

Исследования ионосферы доминировали в научной тематике в первые десятилетия космической эры, что было связано с относительной доступно-

стью низкой орбиты. Затем интерес основных космических агентств сместился к магнитосфере, что привело к преобладанию в ионосферной тематике относительно более доступных спутников массой порядка 100 кг и менее, разрабатываемых «малыми» участниками космической деятельности (Швеция, Франция, Тайвань и т. п.). В последние годы, однако, исследования ионосферы переживают ренессанс, связанный, в том числе, с новыми прикладными задачами: обеспечением качества спутниковой навигации, освоением полярных регионов с практически непредсказуемыми свойствами ионосферы и пр.

Спутники для исследований ионосферы, работающие на низких околоземных орбитах, как правило, имеют меньшую массу по сравнению с высокоапогейными. Это связано с несколькими факторами: уменьшением массы отдельных детекторов, так как плазма ионосферы более плотная и холодная; ненужностью существенных коррекций орбиты; доступностью попутных запусков. Статистика последних лет показывает (рис. 1), что микроспутники (массой менее 100 кг) доминируют по числу запусков, хотя для отдельных задач запускаются и более тяжелые КА (например, три КА SWARM с массой более 400 кг в 2013 г. [13]). Микроспутники, например, использовались для исследования полярных сияний (Index, Япония [14]), транзиентов в атмосфере, связанных с электрическими разрядами («Чибис-М», Россия [15]), томографии по сигналам системы GPS (Formosat-3, Тайвань [16]) и пр. (рис. 4).

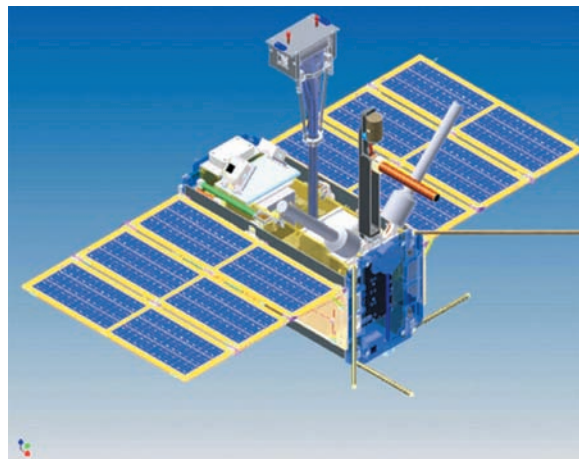


Рис. 4. Микроспутники Reimei (слева) и «Чибис-М» (справа)

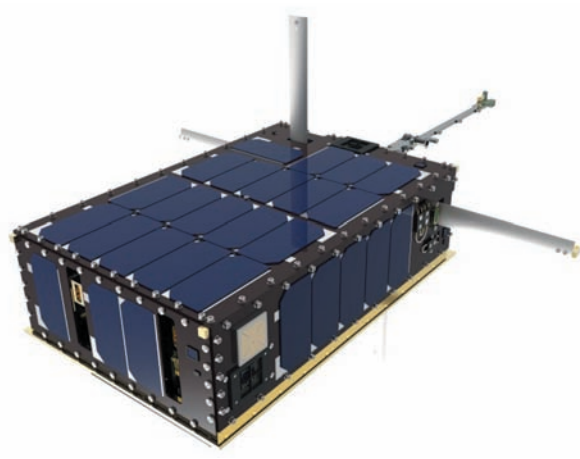


Рис. 5. Наноспутники-кубсаты DICE, формат 1,5U, запуск 2011 г. (слева) и Dellinger, формат 6U, в разработке (справа). Иллюстрации с сайта NASA

Ионосферные исследования стали одними из основных научных задач, декларируемых для кубсатов, так как эти спутники запускаются именно на низкие орбиты. В ионосферных исследованиях достаточно много нишевых научных задач, требующих установки только 1–2 приборов на спутник и, таким образом, вполне доступных для кубсатов. Из нескольких сотен уже запущенных кубсатов такие задачи были четко сформулированы примерно для 10–15 КА, как правило, подготовленных в рамках грантов NASA и NSF. Таким образом, по данной тематике количество запущенных за несколько последних лет кубсатов

примерно равно количеству запусков традиционных КА за 15–20 лет.

Можно отметить некоторые наиболее интересные проекты. Целью КА RAX-2 [17] (2011 г.) размером 3U стало изучение ионосферной турбулентности посредством приема рассеянного сигнала наземных УВЧ-радаров. Одной ракетой с RAX-2 были запущены и КА DICE [18] (рис. 5) для прямых измерений вариаций плотности плазмы в ионосфере. Два спутника размером 1,5U несли одинаковые зонды Ленгмюра для измерения плотности плазмы и электрическую антенну для измерения постоянного и переменного электрических полей.

В рамках международного проекта CINEMA [19] на кубсат размером 3U были помещены магнитометр и комбинированный датчик сверхтепловых электронов, ионов и нейтральных частиц. Одним из самых успешных можно считать кубсат CSSWE (2013) [20], на нем был установлен спектрометр релятивистских электронов для исследования радиационных поясов. Два КА FIREBIRD-II (2015 г.) [21] предназначены для наблюдения вспышек высыпаний электронов из радиационных поясов с высоким временным разрешением. Наконец, КА EchoCube (2015 г.) ориентирован на исследования химического состава ионосферы с помощью масс-спектрометра ионов и нейтралов. Еще около 10 КА готовятся к запуску в ближайшие несколько лет.

Можно выделить несколько характерных типов ионосферных задач, которые решались в упомянутых выше проектах кубсатов или могут эффективно решаться кубсатами в будущем:

1. Исследования достаточно узких проблем (высыпания радиационных поясов, радиопросвечивание и пр.) с помощью единичных приборов, которые ранее по различным причинам не запускались, или при необходимости проверки новых измерительных технологий.

2. Исследования химического состава и вариативности ионосферы на высотах 100–300 км, где время существования спутников мало (например, время схода спутника с высоты орбиты МКС 300–400 км составляет 1–3 мес). Запуски дорогих полноразмерных спутников на такие орбиты практически не осуществляются, а низкая стоимость кубсатов позволяет компенсировать малую длительность полета последовательным запуском нескольких спутников. Ключевым моментом такого проекта является обеспечение наиболее полного сброса научных данных в ограниченный период времени, например путем организации сети приемных станций.

3. Исследования пространственных распределений вариаций ионосферы с помощью группировки спутников как на малых масштабах с помощью локальных измерений, так и на больших масштабах с помощью радиопросвечивания различных типов. Для реализации таких проектов необходимо освоить технологии управления движением и обмена информацией внутри группировки.

Подходы к анализу эффективности сверхмалых КА научного назначения

Общепринятым методом оценки результативности научных проектов является экспертный анализ, однако, тем не менее, целесообразно рассматривать, в основном для предварительной оценки, и некоторые формальные количественные показатели.

Например, можно ввести критерий «относительной стоимости» — отношения количества полученной информации в байтах к стоимости проекта. Проекты по изучению околоземной плазмы при всем разнообразии задач в смысле структуры получаемой информации достаточно схожи. Для ориентира: самый информативный научный проект NASA, солнечная обсерватория SDO, передает около одного терабайта данных в день, а ее стоимость близка к миллиарду долларов. Ограничивая оценку тремя годами работы (гарантийным сроком), получаем величину порядка 10^6 байт/долл. Плазменные магнитосферные и ионосферные проекты в силу ряда технических ограничений генерируют обычно меньший поток информации (максимум гигабайты в день). Оценки для высокоапогейных спутников RBSP, THEMIS составляют порядка 10^4 байт/долл. (за три года), для низковысотных DEMETER, «Чибис-М» — $2\text{--}5 \cdot 10^4$ байт/долл. Несколько большие показатели для ионосферных проектов связаны с их существенно более низкой стоимостью. Необходимо отметить, что реальное время активного существования «больших» спутников составляет не менее 10 лет, а стоимость их эксплуатации незначительна по сравнению с общей стоимостью, поэтому реально достигаемая величина данного показателя кратно больше указанной выше. Важно отметить, что российский микро-спутник «Чибис-М» по данному показателю вполне конкурентоспособен.

Для оценки кубсатов рассмотрим два варианта. «Базовая» конфигурация дешевого (100 000 долл.) стандартного кубсата с радиоканалом порядка 10 кбит/с, одной приемной станцией и сроком работы около 100 дней соответствует показателю только 700 байт/долл., то есть существенно проигрывает классическим проектам. «Сложный» кубсат

стоимостью порядка одного миллиона долларов, функционирующий один год и оснащенный радиолинией 0,5 Мбит/с, соответствует среднему «отраслевому» уровню в 10^4 байт/долл. Увеличение сроков существования кубсатов не должно приводить к существенному росту показателя, так как эксплуатационные расходы (на аренду оборудования и персонал) сравнимы с номинальной стоимостью проекта. Таким образом, критическим требованием является повышение информационной отдачи кубсатов, например путем привлечения дополнительных приемных станций, так как для низковысотных орбит объем сброса данных определяется, прежде всего, интервалом радиовидимости.

Второй критерий — доступность научных данных и их востребованность, определяемая количеством научных публикаций. Большие зарубежные комплексные проекты в последние 20–30 лет за время своего существования обеспечивают публикацию не менее нескольких тысяч научных статей. Для привлечения внимания исследователей все данные измерений выкладываются в архивы с открытым доступом. Ожидаемое число публикаций от кубсата, решающего какую-то одну актуальную научную задачу, составляет порядка 10 статей. Анализ результатов семи кубсатов, упомянутых в предыдущем разделе, показал, что только данные одного проекта CCSWE были полностью переданы в публичный архив. По состоянию на конец 2015 г. только по четырем была опубликована хотя бы одна научная статья по основной тематике проекта, при этом по двум из них была продемонстрирована только работоспособность научной аппаратуры.

Несмотря на то, что относительные показатели («эффективность») сверхмалых КА в целом соответствуют таковым для больших спутников, их абсолютные показатели («результативность») ожидаемо ниже (примерно в пропорции массы или стоимости). Таким образом, основной объем научных результатов по-прежнему создается крупными проектами и такая ситуация сохранится и в обозримом будущем.

Безусловно, важнейшим критерием является и успешность проектов в техническом смысле, оцениваемая по полноте реализации функциональности КА (управление, радиолиния, электропитание,

раскрывающиеся элементы, функционирование научных приборов). В отличие от многих других запусков кубсатов, практически по всем научным проектам такая техническая информация имеется в открытых источниках. Из семи рассмотренных кубсатов только один (CCSWE) функционировал полностью успешно. В двух проектах успех был достигнут только при втором запуске (RAX, Firebird). В проектах CINEMA, DICE, ExoCube научная аппаратура была включена и протестирована, но неполадки КА не позволили начать выполнение научной программы.

Основными причинами отказов были поломки радиолинии, системы управления, неудачное раскрытие штанг и пр., что связывалось в первую очередь с недостаточной наземной отработкой. В этой связи с учетом использования индустриальной компонентной базы и обычно недостаточным опытом персонала в литературе отмечалась рекомендация проведения наиболее полной наземной экспериментальной отработки, вплоть до принятия решения о дате запуска, только после полного завершения испытаний, а также изготовления двух летных образцов для оперативного повторного запуска после исправления ошибок первого.

Выводы

Проведенный анализ показывает, что масса спутника для плазменных исследований существенно зависит от выбора задач проекта. Наряду с большими «флагманскими» проектами, использующими спутники с массой порядка тонны, значительную роль в данной тематике играют и гораздо более многочисленные мини-спутники (менее 500 кг). Тренд миниатюризации в основном проявляется через быстрый рост запусков микро- (менее 100 кг) и наноспутников (менее 10 кг), особенно на низких околоземных орбитах.

Микро- и наноспутники не заменяют крупные проекты, отличающиеся универсальностью и комплексностью научных задач, а дополняют их группировку, решая отдельные научные проблемы, которые по тем или иным причинам не были рассмотрены ранее. Это подтверждается и анализом количественных показателей: малые спутники, будучи вполне сравнимыми по относительным

показателям эффективности, проигрывают по итоговой результативности. Тем не менее, за счет снижения стоимости и роста доступности микро- и наноспутники лидируют по количеству запусков. Интересно, что уменьшение массы до 100 кг не привело к существенному увеличению числа запусков и такие спутники остались единичной продукцией. Количественный прорыв произошел только при переходе к массам до 10 кг. В том числе кубсаты могут освоить и ранее недоступные ниши — больших группировок спутников и спутников с малым сроком существования.

Эффективность «сверхмалых» форм критически зависит от наличия попутных запусков на нужные орбиты, обеспечения наиболее полного сброса данных и других технических проблем. Малые проекты обладают и меньшей социальной заметностью, что потенциально уменьшает интерес к ним космических агентств.

В будущие 10–15 лет в развитии микро- и наноспутников следует ожидать следующие тенденции:

1. Запуски наноспутников на высокоапогейные и отлетные орбиты. В 2018–2020 гг. кубсаты будут запущены в рамках проектов по исследованию Луны и Марса.

2. Создание кластеров наноспутников.

3. Распространение формата кубсатов на нишу микроспутников за счет создания стандартных платформ 6U–12U с массой 10–15 кг (например, разработка NASA GSFC Dellinger (рис. 5)).

4. Появление пикоспутников (менее 1 кг). В массу 100–1000 г можно уместить один простой датчик и простейшую систему поддержки, если, например, требуется работа в ограниченное время в паре с близким КА. Такие конструкции могут быть субспутниками при суборбитальном полете или измерительными блоками, закрепленными на тросе.

Рассмотрим в заключение проекцию ситуации с развитием малых форматов на российский космос. В настоящее время российская космическая программа в части фундаментальных космических исследований испытывает определенное замедление. В период до 2020 г. количество запусков не превысит двух, причем ситуация усугубляется происходящим сокращением финансирования. В программе доминируют крупные и сложные проек-

ты, задуманные зачастую десятилетия назад. Сложившаяся структура ФКП противоречит мировому опыту, демонстрирующему комбинацию относительно редких больших проектов и разнообразия малых спутников с существенно меньшими сроками подготовки.

В России в последнее десятилетие была разработана платформа МКА (200 кг), но после первых двух запусков программа была закрыта в связи с несоразмерным увеличением стоимости. Однако с учетом вышесказанного сохранение проектов класса МКА-ФКИ (в ее доработанном варианте) в ФКП является критически необходимым. Лимитом бюджета такого проекта (без запуска) могла бы быть сумма 2–3 млрд руб., при условии разумного ослабления требований к электронным компонентам.

Разработка микроспутников в России ведется на инициативной основе учебными и научными организациями («научно-образовательные» КА) и частными компаниями. У российских организаций накоплен достаточный опыт работы с такими КА в части как научных приборов, так и служебных систем. Стоимость таких проектов можно оценить в 50–100 млн руб. в ценах начала 2014 г. Число запусков, однако, было невелико, что связано в первую очередь с их достаточно высокой (для бюджета конкретной организации) стоимостью. Организация более регулярных запусков микроспутников возможна только при финансировании из ФКП.

Опыт создания наноспутников в РФ только появляется (SamSat, МКА-Н). Финансирование таких проектов (до 10 млн руб.) возможно и из отличных от ФКП источников (программ развития, крупных грантов и пр.). Однако необходимо создать условия для быстрой разработки и запуска таких КА, укладывающихся в срок до трех лет, в том числе и соответствующую нормативную базу. С целью повышения отдачи целесообразно координировать выбор научных задач проектов, создание наземной базы разработки и управления.

В целом, несмотря на то, что спутники малого формата, особенно с массой менее 100 кг не являются критически необходимыми для обеспечения независимости России в космической технике, более активная роль государственных органов

в развитии микро- и наноспутников позволила бы существенно увеличить общую эффективность научной космической программы, существенно расширить число участников космической деятельности, поддерживать здоровую конкуренцию.

Список литературы

1. Эффективность применения малых космических аппаратов в социально-экономических и научных целях. Отчет по итогам круглого стола в аналитическом центре Российской Федерации. Информационный бюллетень. Ноябрь 2015. <https://leader-id.ru/upload/file/get/2973/>
2. Space Trends. Global Space Activity Overview 1986–2011, ASD-Eurospace, 2012. <http://www.eurospace.org/Data/Sites/1/pdf/spacetrends/eurospacespacetrends2011.pdf>
3. Исследования солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках // Материалы научной сессии секции солнечно-земных связей Совета по космосу РАН. Серия «Механика, управление и информатика» ИКИ РАН. Москва, 2015. <http://iki.cosmos.ru/books/2015petrukovich.pdf>
4. CubeSat Coordinator Developers. CubeSat Design Specification. Cal Poly State University, 2015 г. 16.12.2015 г. http://www.cubesat.org/images/developers/cds_rev13_final2.pdf
5. Achieving Science with CubeSats: Thinking Inside the Box. THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, prepublication draft ISBN: 978-0-309-44263-3 <http://www.nap.edu/catalog/23503/achieving-science-with-cubesats-thinking-inside-the-box>
6. Петрукович А.А. Солнечно-земные связи и космическая погода. Гл. 8 в кн. Плазменная гелиогеофизика. М.: Наука, 2008.
7. Angelopoulos V. et al. First Results from the THEMIS Mission // Space Science Reviews, 2008, vol. 141, is. 1–4. P. 453–476.
8. Burch J.L., Moore T.E., Torbert R.B., Giles B.L. Magnetospheric Multiscale Overview and Science Objectives // Space Science Reviews, 2016, vol. 199, is. 1–4. P. 5–21.
9. Zelenyi L.M., Triska P. and Petrukovich A.A. INTERBALL — dual probe and dual mission // Adv. Space Res., 1997, vol. 20, № 4/5. P. 549–557.
10. Ward A., Bryant D., Edwards T., Parker D., O’Hea A., Patrick T., Sheather P., Barnsdale K., Cruise A. The AMPTE-UKS Spacecraft // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, vol. GE-23, is. 3. P. 202–211.
11. Петрукович А.А., Агафонов Ю.Н., Эйсмонт Н.А. Применение микро- и наноспутников для исследований внешней магнитосферы и солнечного ветра, Материалы научной сессии секции солнечно-земных связей Совета по космосу РАН. Исследования солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках, декабрь 2014 г., Серия «Механика, управление и информатика» ИКИ РАН. Москва, 2015. С. 154–161.
12. Петрукович А.А., Ермолаев Ю.И., Эйсмонт Н.А. Мониторинг солнечного ветра с целью оперативного прогноза гелиогеофизической обстановки. Практические аспекты гелиофизики. Материалы специальной секции «Практические аспекты науки космической погоды» 11-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе» 17 февраля 2016 г. Серия «Механика, управление и информатика» ИКИ РАН. Москва, 2016. С. 11–21.
13. Friis-Christensen E., Lühr H., Hulot G. Swarm: A constellation to study the Earth’s magnetic field Earth // Planets and Space, 2006, vol. 58. P. 351–358.
14. Saito, Hirobumi et al. Small satellite REIMEI for auroral observations // Acta Astronautica, 2011, vol. 69, is. 7. P. 499–513.
15. Зеленый Л.М. и др. Академический микроспутник «Чибис-М» // Космические исследования, 2014, т. 52, № 2. С. 93–105.
16. Anthes R.A. et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early Results // Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, vol. 89, is. 3. P. 313.
17. Cutler J. W. Hasan Bahcivan Radio Aurora Explorer: A Mission Overview // Journal of Spacecraft and Rockets, 2014, 51(1). P. 39–47.
18. Fish C.S. et al. Design, Development, Implementation, and On-orbit Performance of the Dynamic Ionosphere CubeSat Experiment Mission // Space Science Reviews. 2014. Vol. 181, Is. 1. P. 61–120.
19. Archer M.O., et al. The MAGIC of CINEMA: first in-flight science results from a miniaturized anisotropic magnetoresistive magnetometer // Annales Geophysicae, 2015, vol. 33, is. 6. P. 725–735.
20. Li X., et al. First results from CSSWE CubeSat: Characteristics of relativistic electrons in the near-Earth environment during the October 2012 magnetic storms // Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2013, vol. 118, is. 10.
21. Crew A.B. First multipoint in situ observations of electron microbursts: Initial results from the NSF FIREBIRD II mission // Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2016, vol. 121, is. 6. P. 5272–5283.