

# “Малыши” завоевывают мир<sup>1</sup>

М.Ю. Овчинников<sup>2</sup>

Существуют различные признаки, по которым классифицируются космические аппараты – по назначению полезной нагрузки, по цели запуска, по национальной принадлежности, по способу вывода, по времени активного существования и так далее, но есть один признак, формально относящийся к массе и размерам аппарата, по сути может рассматриваться как качественный. В 90-х годах прошлого столетия все чаще стал звучать термин малый спутник, микроспутник. В чем же особенность таких аппаратов и что явилось причиной их появления.

Когда говорят о малых спутниках, то первым признаком обычно называется его *масса* как наиболее близко ассоциируемая с понятием «малый». Приводятся массы от тонны (сравните с массой Международной космической станции, и станет понятна «малость» такого аппарата) до десятков граммов (действительно, в привычном понимании это «мало»). Следующий параметр, — это размер аппарата. Здесь срабатывает ассоциация «метр с кепкой»: что ниже меня — то «малый». Или уж совсем «маленький» — то, что помещается в руке, в кармане (помнится, однажды получил письмо от иностранного отправителя, где в адресе по-русски было написано «Руководителю отдела маленьких спутников» — было немного смешно, но это отражало понимание весьма далеких от космической техники людей того, чем мы занимаемся). Остальные внешне не видимые признаки являются уже предметом профессионального интереса.

Так что же такое «малый спутник»? Существуют ли признаки, по которым малые спутники отличаются от действительно больших спутников и которые выходят из плоскости размер-масса? Можно ли дать строгое определение этому понятию? Попробуем проследить генезис этого названия и определимся с терминами и понятиями.

Сейчас трудно установить приоритет того, кто впервые использовал это слово как термин, классифицирующий новый класс космических аппаратов. В 1990 году известная европейская фирма Ariespace, разработчик и производитель ракет-носителей Ariane, предложила платформу под названием [ASAP](#) (Ariane Structure for Auxiliare Payloads) в виде большой плоской шайбы диаметром 2.9 м, размещаемой между последней третьей ступенью ракеты Ariane-4 и выводимым ею основным космическим аппаратом. На платформе были размещены шесть спутников значительно меньшего размера по сравнению с основным аппаратом (рис. 1). С космодрома Куру во Французской Гвиане 22 января 1990 года попутно с основным спутником SPOT-2 (масса 1870 кг) ракета-носитель Ariane-4 (V35) вывела на солнечно-синхронную почти круговую орбиту высотой около 790 км и наклоном 98.6° шесть малых спутников: радиолобительские американские PACSAT и Webersat, аргентинский Lusat и бразильский Microsat-2 (каждый массой по 12 кг), а также английские UoSat-3 и Uosat-4 (по 48 кг). После отделения основного спутника и отхода его на безопасное расстояние малые спутники отделились в заданной последовательности с помощью пружинных толкателей. Дальнейшую хронологию использования платформы ASAP для вывода малых спутников можно

---

<sup>1</sup> [Первый вариант](#) этой статьи под названием “Малые мира сего” был опубликован автором в журнале Компьютерра N 15, 2007, с.37-43.

<sup>2</sup> [Овчинников Михаил Юрьевич](#), заведующий сектором в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической механики МФТИ. Член-корреспондент Международной академии астронавтики (IAA). Принимал участие в ряде проектов малых спутников, в том числе Искра-5, МАК-А, Старт-1, СПС-Спутник, УМКП-1, Munin, REFLECTOR, THC-0, THC-1.

посмотреть, например, [здесь](#), а иной возможный способ попутного вывода на ракете Ariane-5 и хронологию попутного вывода на этих носителях [здесь](#).



Рис.1. Платформа ASAP для попутного вывода микроспутников

Тогда же Arianespace предложила условную классификацию спутников *по массе* (см. таблицу 1). Попытки понять или ввести какие-то соответствия или ассоциацию кроме того, что micro, nano и pico последовательно отстоят друг от друга на три порядка, не приводят к успеху. Однако использование этой классификации в качестве некоторого общепринятого критерия или “птичьего языка” оказалось удобным. Кстати, по этому формальному признаку первый советский искусственный спутник Земли, выведенный на орбиту 4 октября 1957 года, массой 83 кг вполне принадлежит классу микроспутников, а первый американский спутник Explorer-1, выведенный на орбиту 1 февраля 1958 года, массой 8.3 кг попадает в класс наноспутников. Следующий американский спутник Vanguard-1 (17 марта 1958 года) массой 1.5 кг вообще приблизился к классу пикоспутников. Иногда малыми спутниками называют все упомянутое множество аппаратов, а микроспутниками — все спутники с массой менее ста килограммов. Пикоспутники, в свою очередь, могут подразделяться на еще более мелкие классы. Пример [пикоспутника](#) приведен на рис.2. В общем, будем считать, что формальная классификация введена.

Таблица 1

| Mini        | Small      | Micro     | Nano    | Pico   |
|-------------|------------|-----------|---------|--------|
| 1000–500 кг | 500–100 кг | 100–10 кг | 10–1 кг | 1–0 кг |

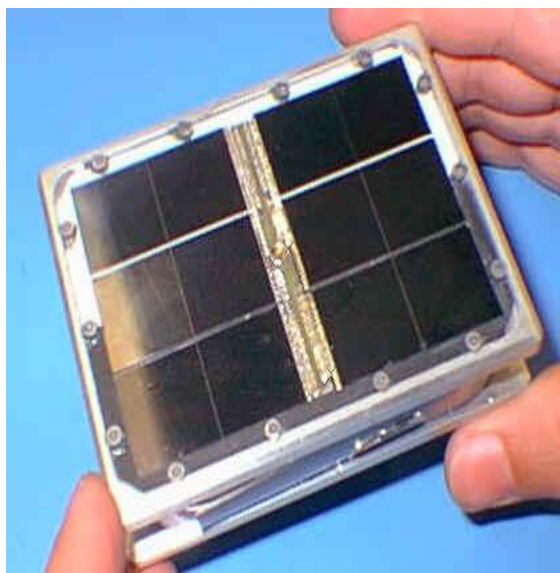


Рис.2. Пикоспутник Stensat

Что же еще такого уникального в малых спутниках? Оказывается, не малые размеры и массу привнес термин «малые спутники». Точнее, не только размеры и массу, а иную идеологию подхода к разработке и использованию космических аппаратов. Например, попробуйте решить, что выгоднее — делать дорогой универсальный спутник, который уж если его вывели на орбиту, то он должен в течение долгого времени решать возложенные на него задачи, или же относительно быстро разработать, изготовить и вывести на орбиту несколько сравнительно недорогих аппаратов, чтобы, как это ни кощунственно звучит, в случае возможной поломки одного из них, вывести на орбиту следующий аппарат? Особенно если принять во внимание, что электронная компонентная база развивается столь стремительно, что быстродействие бортового компьютера через короткое может увеличиться на порядок, а разрешение электронных камер позволит делать снимки значительно более высокого разрешения, чем прежде. А снизить стоимость вывода на орбиту можно, используя легкие носители, например, конверсионные. В 90-х годах прошлого столетия [конверсионные ракеты](#) рассматривались как радикальный способ снижения стоимости вывода на орбиту малых спутников<sup>1</sup>. Особенно этот вопрос муссировался в связи с необходимостью уничтожения в большом количестве баллистических ракет по советско-американскому Соглашению о сокращении ядерного оружия и средств его доставки.

Здесь следует вспомнить отечественные, стартующие с подводных лодок ракеты «Волна» и «Штиль» (адаптированные из боевых ракет морского базирования для вывода, соответственно, на баллистическую траекторию и на орбиту вокруг Земли микроспутников). Или, например, твердотопливные «Старт» и «Старт-1». Есть еще «Рокот» и «Стрела», ракеты «Космос» и «Днепр»... . Несмотря на то, что почти все из перечисленных носителей были уже использованы для запуска малых спутников, пожалуй, наиболее пригодной для этого оказалась ракета-носитель «Днепр», разработанная на базе межконтинентальной баллистической ракеты «Сатана» (по натовской классификации SS-18). Такое «имя» ей дали американцы, видимо, из-за «полезной» нагрузки состоящей из несколько боеголовок, обладающих возможностью индивидуального наведения и способностью маневрировать в атмосфере, что делало практически нерешаемой задачу их перехвата. Предлагаемый фирмой [«Космотрас»](#) — провайдером услуг «Днепр» — сервис включает размещение и вывод на орбиту нескольких микроспутников, устанавливаемых на платформу типа ASAP, размещаемой на разгонной ступени ракеты (Рис.3).



Рис.3. Размещение микроспутников на адаптере ракеты-носителя Днепр

Однако особых иллюзий о возможности решения таким образом задачи дешевого запуска малых спутников питать не следует. Конверсионные ракеты требуют немалых затрат для модернизации и адаптации к новым для них задачам. Да и «акулы рынка» запусков не допустят их широкого «демпингующего» использования. Все так, конечно, но... лед тронулся. Появилось другое понимание того, как можно решать задачи в космосе с меньшими временными и материальными затратами.

Продолжая тему снижения стоимости доставки малых спутников на орбиту, следует упомянуть интенсивно обсуждавшийся в прессе способ вывода малых спутников — с помощью, например, крылатых ракет. Были даже инициированы несколько авиационно-космических проектов вывода малых спутников на легких ракетах, несомых различными самолетами (Ту-160, «Мрия», МиГ-31), но большинство из них так и остались проектами. Практически осуществить этот способ удалось лишь американцам на ракете [Pegasus](#) (разработка фирмы Orbital Sciences Corporation, США), стартующей с самолета В-52. В частности, 17 июля 1991 года с борта самолета В-52, базирующегося на авиабазе Эдвардс, так был осуществлен запуск ракеты-носителя «Pegasus HAPS», которая вывела на низкую околоземную орбиту семь американских военных микроспутников связи Microsat-1, ..., Microsat-7 каждый массой 22 кг. Основными достоинствами такого способа вывода являются малое время, необходимое для подготовки и реализации запуска, и возможность вывода спутника на орбиту достаточно произвольного наклонения. Недостатком — малая масса выводимой полезной нагрузки. В настоящее время отечественные разработчики вновь вернулись к этой идее. Интенсивно разрабатывается проект [“Воздушный старт”](#), использующий самолет-носитель АН-124-100ВС "Руслан" как воздушную стартовую платформу и двухступенчатую ракету-носитель Полет. При этом ожидается, что расчетная стоимость выведения одного килограмма полезного груза составит около 10000 долларов - против 30000 долларов у аналогичного



американского пускового комплекса Pegasus-XL и 40000 долларов у космического корабля многоразового использования (Шаттл).

В начале 80-х годов в Центре космических полетов им. Годдарда (США) была разработана GAS-программа ([Get Away Special Program](#)), в рамках которой осуществлялся вывод микроспутников с борта Шаттлов. Спутники массой до ста килограммов размещались в специальном контейнере цилиндрической формы и выталкивались с помощью пружинного толкателя после выхода Шаттла на орбиту при минимальном участии экипажа корабля.

В настоящее время используются в основном два способа вывода малых спутников — либо на среднем носителе типа Ariane попутным запуском, либо на легком носителе типа «Днепр», специально ориентированном на групповой запуск такого типа аппаратов. Основной недостаток обоих способов — ожидание подходящего по срокам пуска и планируемой орбите вывода носителя. Появились даже фирмы, специализирующиеся на посредничестве в поиске и отслеживании нужных по срокам и орбитам носителей. В США для запуска малых спутников используются средства собственной разработки, например, ракета «Delta» в разных модификациях. При этом как в США, так и в Европе реализуются предпочтения в использовании национальных средств вывода спутников на орбиту («акулы рынка» не дремлют!).

Конечно же, не все задачи под силу решить малыми аппаратами — попробуйте, например, запустить космонавта на корабле с недостаточной надежностью или разместить большую оптическую систему на малом спутнике — отношение  $\lambda$  к  $d$  еще никто не отменял. Действительно, способность оптических приборов давать раздельное изображение двух близких точек характеризуется их разрешающей способностью. Дж.Релей, используя теорию дифракции, ввел критерий, в соответствии с которым предельное угловое разрешение определяется выражением  $1,2 \lambda/d$ , где  $\lambda$  — длина волны,  $d$  — диаметр апертуры - входного отверстия оптической системы. Тем самым, исходя из этого критерия, независимо от класса спутника должна быть обеспечена минимально необходимая апертура оптической системы.

Фактически, при разработке и использовании микроспутников работает принцип — оптимум достигается не на границах интервала, а где-то между ними. Но где? В общем, все это требует применения более сложных методов принятия решений. Например, как говорит поговорка — хорошо быть и здоровым, и богатым. А если хотя бы один компонент отсутствует? Допустим, имеющиеся материальные или финансовые ресурсы не позволяют быстро построить большой аппарат. «Длинных» ресурсов нет, но задачи же решать надо. Тогда можно попробовать использовать распределенный по времени ресурс — сегодня решаем часть задачи, придавая ей статус законченной, а при поступлении следующего ресурсного транша повторяем процедуру. Действуем «методом декомпозиции» — разбиением нерешаемой в целом и сразу задачи на подзадачи, каждую из которых удастся решить имеющимися средствами. Даже если в дальнейшем ресурсы и не поступают, то задача уже частично решена (накоплены знания, получена необходимая информация, проверена технология, продемонстрированы возможности, подготовлены специалисты).

Так что же нового привнесло понятие малый спутник? Ведь еще в 60-х годах ВНИИЭМ — российское предприятие космической отрасли, которое ранее разработало спутники серии МЕТЕОР и ГОМС для составления прогнозов погоды, РЕСУРС-О и их модификации для наблюдения Земли, льдов мирового океана, разработало и вывело на орбиту для отработки технологии управления угловым движением спутников с помощью электродвигателей-маховиков два малогабаритных спутника массой около 100 кг каждый («Электро-1» и «Электро-2»). Их макет можно и сейчас увидеть в Политехническом музее в Москве. Правда, тогда никто не называл их малыми спутниками (ведь и упомянутый выше первый искусственный спутник Земли тоже попадал в этот класс). Да многие

исследовательские спутники на заре космической эры по массе вполне попадали в этот диапазон (навигационные спутники Transit, исследовательские GGSE, Magion, спутники серии «Радио» и Oscar и многие-многие другие). [Профессор Мартин Свитинг](#), ныне исполнительный директор [SSTL](#) (Surrey Satellite Technology Ltd) — по нашим меркам малого предприятия, образованного на базе исследовательской лаборатории Университета графства Суррей на западе от Лондона, которое занимает лидирующие позиции в мире по разработке, созданию, запуску, а также и внедрению в образовательный процесс малогабаритных спутников, и директор Surrey Space Center в 80-х годах на заре своей трудовой деятельности разработал и запустил вместе с коллегами несколько микроспутников, которые назывались «радиолюбительскими». Но опять же их никто тогда не называл «малыми». SSTL является хорошим примером, как сейчас модно говорить, инновационной компании малого бизнеса, показавшей как можно трансформировать знания и технологии в бизнес и политику. Кстати, Мартин получил в 2002-ом году почетное рыцарское звание “сэр” от королевы Великобритании за заслуги в области освоения космоса и теперь правильно писать Sir Martin Sweeting. Микроспутник Tsinghua-1, созданный совместно SSTL и Китаем, на базе типовой платформы SSTL общей массой с полезной нагрузкой до 70 кг изображен на рис.4.

Рис.4. Микроспутник Tsinghua-1 базе типовой платформы SSTL

Оказавшись в середине 90-х годов на Workshop’е, организованном моей коллегой и соавтором профессором Сюзан МакКенна Лола и проходившим в Ирландии под эгидой Международной академии астронавтики ([IAA](#)) и посвященном малым спутникам, а потом, посетив лабораторию Мартина Свитинга и будучи знакомым с отечественными космическими разработками, я с удивлением обнаружил совершенно иной подход к формированию идеологии создания и организации разработки и испытаний космических аппаратов. Попробуем сформулировать основные особенности этой идеологии. Это - сочетание классических подходов (законы небесной и теоретической механики, требования по чистоте при интеграции аппарата, предполетные испытания никто не

отменял) плюс сокращение традиционных конструкторских и технологических требований к разработке, созданию, запуску и эксплуатации. Это относится к количеству экземпляров аппаратов, предоставляемых для испытаний, использование комплектующих в «космическом» исполнении, управление и передача данных через комплекс космической связи и центры управления, специальная система приемки, испытаний, допуска к запуску и т. п. Именно отказ от строго следования этим требованиям позволил вовлечь большое количество университетов и небольших компаний по всему миру в разработку, создание и использование малых спутников.

Можно выделить два основных направления, по которым идет развитие малых спутников. Первое направление (условно назовем его университетским) базируется на весьма противоречивой идее «Better, Faster, Cheaper» («Лучше, быстрее, дешевле»), провозглашенной в американской программе [NASA X2000](#) (программа разработки и создания миниатюрных космических аппаратов). Хотя правильней уж сказать *low cost* спутники, так как термин *cheap* в английском языке носит смысл «дешевка», а не низкая стоимость. Анализ эффективности предложенной парадигмы приведен в статье<sup>2</sup> Джима Ватчина из NASA Goddard Space Flight Center (США). Интерпретация для детей почему надо делать малые спутники в забавной форме приведена на сайте [NASA](#). Спутники, разработанные по такой идеологии, действительно являются малыми по массе и габаритам (обычно это 10÷100 кг по массе и несколько десятков сантиметров в размере соответственно). При их изготовлении используются самые доступные компоненты, как правило, даже не проходящие сертификации для применения в условиях космоса и это — при обычно негерметичном исполнении корпуса спутника! Невысокая стоимости обусловлена тремя «составными частями»: недорогие комплектующие, дешевые студенческие рабочие руки и, — при малой массе спутника, — дешевый, а зачастую и бесплатный вывод на орбиту. Такие спутники, конечно, не решают сложные научные или технологические задачи. Полезная нагрузка для них может поставляться ее разработчиками даже бесплатно с целью, например, проверки ее работоспособности в условиях космоса перед ее использованием в дорогостоящих проектах.

Пожалуй, основным результатом такого подхода является обучение специалистов через их участие в практической работе, пусть и не сложной, но содержащей все основные этапы реальных проектов чего не удастся достигнуть при любом, сколь угодно изощренном аудиторном обучении. Еще одним достоинством такого способа обучения является возможность для студента принять участие во всех этапах проекта — от замысла до обработки полетных данных в течение всего срока своего пребывания в университете. Перечислим только несколько известных зарубежных университетов, которые интенсивно вовлекают студентов в разработку малых спутников:

- Университет графства Суррей (ныне — SSTL) (начинали со спутников UoSat, всего к началу 2007 года запущено 27 малых спутников);
- Стэнфордский университет (проект [OPAL](#), пикоспутники StenSat массой 0,2 кг(!), QuakeSat, CubeSat);
- Технический университет Берлина (наноспутники TUBSat);
- Центр космических технологий и микрогравитации Бременского университета (BremSat);
- Университет штата Юта (аппарат [NuSat](#));
- Университет Санта Клара (спутник [Artemis](#));
- Университет Рима La Sapienza (четыре микроспутника [UniSat](#));
- Массачусетский технологический институт (проекты [SPHERES](#) и [EMFF](#)).
- Университет Токио (CubeSat'ы)

Интересное предложение сделал профессор Роберт Твиггс из Стэнфордского университета несколько лет назад: каждый желающий может запустить индивидуальный наноспутник массой 1 кг и размером 10x10x10 см — эдакий кубик — и назвал его

CubeSat. Объявленная цена такой услуги — 50 тысяч долларов. Нельзя сказать, что выстроилась очередь из желающих, но то, что мода пошла на CubeSat'ы, сказать можно точно. На рис.5 изображен макет спутника в руках профессора Клауса Шиллинга из Университета Вюрцбурга (Wuerzburg University), Германия, под руководством которого по идеологии CubeSat'a был разработан студентами и успешно выведен на орбиту 27 октября 2005 года спутник [UWE-1](#). Всего к настоящему времени изготовлено более 35 спутников этой серии и большинство из них выведено на орбиту.



Рис.5. CubeSat (UWE-1) в руках профессора Клауса Шиллинга из Университета Вюрцбурга

В России примером такого подхода являются проекты малых спутников, разрабатывавшиеся в недалеком прошлом и разрабатываемые сейчас, например, в МАИ, МГТУ, МЭИ, САКУ, ВИКИ, МГУ. Достаточно подробный перечень проектов микроспутников приведен [здесь](#). В качестве примеров можно привести российско-американский наноспутник [REFLECTOR](#)<sup>3</sup> массой 6 кг (рис.6), разработанный НИИ прецизионного приборостроения совместно с ИПМ им. М.В. Келдыша РАН при участии студентов МФТИ. На нем впервые удалось определить параметры углового движения с использованием бортовых лазерных ретрорефлекторов по результатам внешнетраекторных измерений наземными лазерными станциями<sup>4</sup> и первый отечественный наноспутник [ТНС-0 N1](#)<sup>5</sup> (рис.6), созданного в РНИИ космического приборостроения также совместно с ИПМ им. М.В. Келдыша РАН при участии студентов МФТИ. Стоит упомянуть также микроспутник «Татьяна», запущенный в честь 250-летнего юбилея МГУ им. М.В. Ломоносова и микроспутник «Колибри», разработанный ИКИ РАН.





Рис.6. Наноспутник REFLECTOR (НИИ ПП) для проведения уникальных экспериментов с помощью лазерных наземных телескопов



Рис.7. Макет первого российского наноспутника ТНС-0 в руках автора статьи

Безусловно, заслуживает внимания опыт НАСА финансирования более сорока студенческих проектов малых спутников в университетах США, в частности, в Стэнфордском университете.

Примером успешного развития работ по линии студенческих проектов является упоминавшаяся уже английская фирма [SSTL](#), движущей силой которой является сэр Мартин Свитинг. Мартин еще в 80-х годах начал свою деятельность в университете с обучения студентов, а в настоящее время на примере изготавливаемых его фирмой малых спутников обучает иностранных специалистов из развивающихся стран, выводя эти страны в разряд «космических». Помимо прямого экономического эффекта для компании это повышает ее авторитет на рынке оказания космических и образовательных услуг. В SSTL с удовольствием идут на стажировку, в аспирантуру и на работу много молодежи.

Европейское космическое агентство организовало международные студенческие проекты малых спутников ESEO (European Student Earth Orbiter) и ESMO (European Student Moon Orbiter) в рамках программы [SSETI](#) (Student Space Exploration and Technology Initiative), целью которых является обучение студентов работать в распределенной команде, состоящей из групп более чем из 20-ти европейских университетов.

Суммируя сказанное выше, можно утверждать, что инвестиции в такого рода студенческие проекты со стороны промышленности и государственных структур в России, например, Министерства образования и науки, Федерального космического агентства могли бы привести к важным прямым (отработка новых технологий и технологических решений) и косвенным (обучение молодых специалистов, способных к активному участию в реальных космических и других высокотехнологических проектах) положительным результатам. Тем более это становится важным в свете объявленных приоритетов России в космосе и внедрению высоких технологий в оборонно-промышленный комплекс.

Следует обратить внимание, что Европейское космическое агентство уделяет пристальное внимание вовлечению молодежи в космическую отрасль — существует специальная программа поддержки участия студентов и молодых исследователей в работе конгрессов Международной академии астронавтики — главного ежегодного мирового форума по космонавтике. На этих конгрессах в последние годы открывается даже специальный павильон для общения молодежи, совместного прослушивания лекций, а фактически, — формирования будущего поколения исследователей и разработчиков, объединенных планами, интересами и устремлениями. Очень жаль, что наши молодые исследователи попадают на такие мероприятия лишь по инициативе их руководителей. Здесь требуется тоже программа поддержки. На одном из предыдущих Конгрессе Международной федерации астронавтики (IAF), проходившем в Валенсии в октябре 2006 года, помимо преференций, отдаваемых молодежи, также была выделена группа убежденных седидами опытных исследователей и инженеров, привлекаемых к передаче опыта молодым участникам.

Кстати, проекты малых спутников — это те точки роста, вокруг которых охотно объединяются национальные и интернациональные молодежные коллективы. Сопутствующим фактором для создания интернациональных групп, в том числе и с участием российских студентов, является европейская образовательная программа Erasmus Mundus обмена студентами-дипломниками, но и здесь пока тоже все определяется инициативой и личными связями руководителей. Организация совместных исследовательских групп для выполнения научно-образовательных проектов с участием ведущих ученых из Европы, Азии, России способствует привлечению к работе и российских студентов и аспирантов. Тесное переплетение науки и образования при поддержке РФФИ, Роснауки, Министерства науки и образования России, DAAD, других отечественных и зарубежных организаций позволили создать группу, состоящую из профессоров, кандидатов наук, аспирантов и студентов, которой по силам проводить как

самостоятельные исследования и разработки в интересах отечественных потребителей, так и совместные проекты с зарубежными участниками. При этом зачастую наши студенты и аспиранты вполне справляются с ролью руководителей проектов. Важную роль в выполнении таких работ и в подготовке молодых специалистов (последнее стало сейчас особенно важно) играют созданные и оборудованные вначале в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (рис.8), а затем и в МФТИ [специализированные лаборатории](#)<sup>6</sup>, в которых молодые исследователи не только слушают лекции и выполняют лабораторные работы, но имеют возможность самостоятельно изготовить [макет реальной системы идентификации](#) и управления спутника, провести весь комплекс исследования – от идеи через математическую модель и компьютерное моделирование к лабораторному макетированию и при известной доле везения – совместно с заказчиком провести эксперимент в космосе.

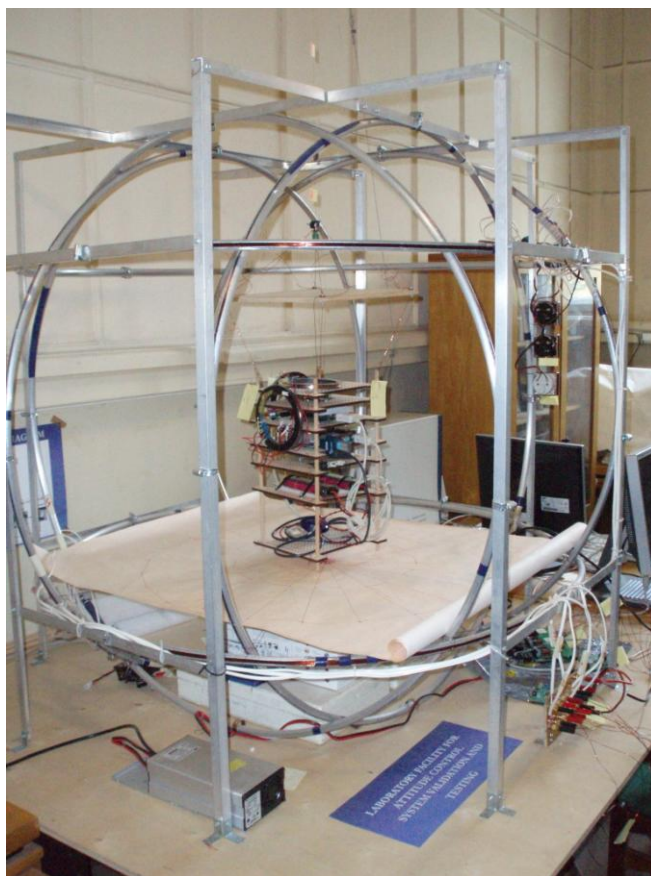


Рис.8. Стенд для лабораторной отработки моделей и алгоритмов управления в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Можно сказать, что это первое направление приложения малых спутников, особенно важно для России, ибо космическая отрасль, будучи областью приложения высоких технологий из многих отраслей науки и техники, должна служить одним из локомотивов инновационного развития России, о чем сейчас так часто говорят с высоких трибун.

Второе направление (условно назовем его «промышленным») инициируется космическими фирмами и агентствами с целью создания «серьезных» проектов в отличие от «студенческих».

Используемые современные технологии, конечно же, не способствуют удешевлению самого спутника. Чаще всего спутники становятся даже дороже. Ибо прямое, уменьшающее габариты масштабирование лишь увеличивает трудоемкость

изготовления, например, малогабаритных приводов или реактивных двигателей, при очевидном снижении лишь затрат на материалы. Однако, применяя современные достижения в электронике, нанотехнологии, материаловедении и нетрадиционные подходы к конструированию, удастся создать спутники, значительно отличающиеся по массе и размерам в меньшую сторону от традиционных аппаратов. При уменьшении массы спутника значительная экономия достигается в процессе его вывода на орбиту, особенно на орбиту межпланетных перелетов, так как цена запуска традиционно вычисляется «покилограммно». Примерами малых спутников, разработанных организациями космической отрасли, могут служить японский [NOZOMI](#) для полета на Марс (запуск — 1998 год), европейский [SMART-1](#) массой 350 кг, выведенный на орбиту в 2003 году и достигший окрестности Луны с использованием двигателей малой тяги, разрабатываемый отечественный малый спутник «Фобос-Грунт» для доставки грунта с Фобоса. Вызывает несомненный интерес миссия Японского национального космического агентства под названием [Hayabusa](#). После запуска с японского космодрома 9 мая 2003 года и совершения в мае 2004 года гравитационного маневра около Земли аппарат достиг окрестности астероида Итокава размером чуть больше полукилометра. А уже 20 и 26 ноября 2004 года аппарат три раза совершил посадку на астероид (вторая космическая скорость для этого астероида составляет лишь 0,2 м/с!), после чего взял курс на Землю с образцами грунта. Его прибытие ожидается в 2010 году. При пролете планеты ее гравитационное поле изменяет скорость аппарата как по величине, так и по направлению, что весьма широко используется в межпланетных миссиях для осуществления гравитационного маневра (fly-by маневр). Действие гравитационного поля планеты можно сравнить с пращей. При этом необходимо весьма точно обеспечить пролет аппарата на заданном удалении от ее поверхности. Впервые был реализован во время полета спутника Луна-3 в 1959 году для фотографирования ее обратной стороны.

Малые спутники инициировали еще один подход к космическим исследованиям. В настоящее время интенсивно разрабатываются полеты группировок малых спутников (Formation Flying) для проведения физических и других экспериментов. Formation Flying состоит из нескольких спутников, объединенных одной целевой задачей и выполняющих совместный полет на небольшом удалении друг от друга (от десятков метров до десятков километров). Взаимное положение и движение спутников контролируется и управляется<sup>7</sup>. В 2008 году ожидается технологический запуск двух малых спутников в рамках европейского проекта [Prisma](#) (массой 150 и 40 кг), разрабатываемых Швецией совместно с Германией, Францией и Данией. Предполагается их полет с маневрированием и стыковкой.

Большой интерес уделяется использованию малых спутников для наблюдения Земли из космоса, несмотря на пресловутое отношение  $\lambda$  к  $d$ . Можно смело сказать, что каждая страна, входящая в «клуб космических держав», старается свой первый спутник снабдить камерой для съемки поверхности Земли. Помимо ежегодных Конгрессов Международной федерации астронавтики каждые два года в апреле месяце, в Берлине, начиная с 1996 года, на Симпозиум «Малые спутники для наблюдения Земли из космоса» собираются фанаты этого их применения. Среди большого количества проектов, в том числе и реализованных, отмечу лишь два, с моей точки нетривиальных в идее и в исполнении. Это - [Flying Laptop](#), разрабатываемый в Институте космических систем Университета Штутгарта, и [PRISM](#) – в Лаборатории интеллектуальных систем Университета Токио.

Микроспутник Flying Laptop массой около 100 кг несет три камеры наблюдения и прецизионную систему ориентации, содержащую, пожалуй, весь мыслимый набор датчиков и исполнительных органов, для обеспечения точности ориентации в 150 угловых секунд. Особенностью спутника является наличие программируемой вентильной матрицы с большими собственными вычислительными возможностями, которая может быть



запрограммирована самим пользователем (в условиях космического полета с наземной станции). Скорость передачи данных на Землю — 100 Мбит/с. Спутник разрабатывается в кооперации с ведущими германскими организациями (например, Фраунгоферовский институт компьютерной архитектуры и технологии программ). Этот микроспутник вряд ли можно отнести к числу дешевых «университетских» спутников.

Второй спутник относится к классу наноспутников, имея массу менее 5 кг и размеры 15x15x20 см. Спутник создан на базе идеологии CubeSat, прошедшей испытания на предыдущем изготовленном в Университете Токио и выведенным на орбиту пикоспутнике [CubeSat-XI](#) массой около 1 кг. Особенностью спутника является использование гравитационной штанги для создания управляющего момента и формирования длиннофокусного объектива. Гравитационная штанга представляет собой устройство в форме стержня, разносящее части спутника друг от друга на определенное расстояние. Из-за того, что сила притяжения каждой части спутника Землей зависит от расстояния до ее центра, то создается механический момент, стремящейся выставить штангу вдоль направления на центр Земли (местной вертикали). Это принцип ориентации широко используется в космической технике для обеспечения ориентации спутников, начиная с орбитальных станций и заканчивая пикоспутниками. При этом штанга состоит из упругих тонких стержней из пластика, сплетенной подобно корзине из ивовых прутьев. В сложенном состоянии она похожа на плоское птичье гнездо, а в развернутом — представляет собой жесткий «скелет» трубы длиной около 60 см, на конце которой закреплен объектив камеры. Ожидаемое оптическое разрешение составляет 10–15 метров на пиксель. Система ориентации включает в себя также три маховика и три токовых катушки с солнечным, магнитным и гироскопическим датчиками ориентации.

Из отечественных проектов микроспутников для наблюдения Земли хочется обратить внимание читателя на недавно анонсированный проект спутника [«Прозрачный Мир»](#), разрабатываемый НПО «Полет» при финансовой поддержке ИТЦ «СканЭкс». Предполагается, что микроспутник будет распространять изображения в непрерывном режиме передачи в реальном масштабе времени с пространственным разрешением 50 м в полосе шириной 400 км в четырех спектральных каналах (голубой, зеленый, красный и ближний ИК). Служебные подсистемы предполагается создать на базе столь новейших технических разработок, что любопытно их здесь процитировать. «Для трехосной ориентации изготовлены гиромаховики управления с максимальной частотой вращения более 90 000 об/мин и массой 35 г каждый. В их конструкции использованы принципы плавающей подвески роторов, самые современные швейцарские и российские технологии, цифровое управление обмотками электромоторов и интеллектуальный контроль управляющего и кинетического момента. В подсистеме ориентации в качестве датчиков использованы высокоточный магнитометр массой 60 г и мощностью 0.1 Вт, электромагниты массой по 50 г, высокоточные солнечные датчики по 125 г. Все датчики интегрированы в микропроцессорную структуру, состоящую из четырех малопотребляющих микроконтроллеров DSP. Навигацию в космосе обеспечивает бортовой GPS-приемник массой 150 г вместе с антенной. Для коррекции параметров орбиты предназначена двигательная установка тягой 0.003 Н при удельном импульсе более 100 с и массой 100 г. Для передачи на Землю видеоизображений от оптической камеры разработаны передатчики со скоростью 32 Мбит/с при энергопотреблении 40 Вт и массе 1.6 кг. Информационный поток данных ДЗЗ с использованием этого передатчика достигает 60 Гбайт в сутки».

Отметим, что практически отсутствуют в классе микроспутников радиовещательные и телевизионные спутники. Это легко объясняется «законами сохранения» типа «отношения  $\lambda$  к  $d$ », так как для работы вещательного передатчика нужна электроэнергия, запас которой определяется площадью солнечных батарей, а тогда ... это уже будет не малый спутник. Для транспортировки электронных сообщений в режиме



почтового ящика или персональной связи, не потребляющих много электроэнергии, малые спутники использовались 60-х годов под названием «Стрела-1» и «Стрела-2», а затем в конверсированном виде под название [«Гонец-Д»](#). Масса аппарата составляет около 300 кг, скорость передачи данных 1.2–64 кбит/с, пропускная способность системы — 1000 Мбит/сутки. Зарубежные системы связи включают в себя микроспутники [Orbcomm](#) (масса от 22 до 28 кг), малые спутники [Globalstar](#) (массой 220 кг). Каждая из систем содержит в своем составе несколько десятков спутников, летающих на орбитах с разными аргументами восходящего узла, что приводит более-менее равномерному покрытию земной поверхности их траекториями. Эти спутники скорее можно связными, коммуникационными, но не радиовещательными.

Трудно дать в журнальной статье обзор малогабаритных спутников, число которых сегодня составляет не менее сотни. Хочу лишь привести несколько примеров микро- и наноспутников, которые определенно явились «законодателями мод» в области создания таких аппаратов:

- микроспутники [UoSat](#), созданные в Университете графства Суррей и позже в SSTL, с гравитационной штангой и токовыми катушками для обеспечения ориентации заданной оси спутника на Землю (эта система ориентации надолго стала объектом подражания для многих начинающих разработчиков микроспутников во всем мире);

- наноспутники [TUBSat](#) — результат работы группы молодежи под руководством профессора Удо Рейнера в Техническом университете Берлина — одни из первых стали снабжаться миниатюрными двигателями-маховиками, обеспечивающими прецизионное управление угловым движением;

- радиолюбительские микроспутники [PACSAT](#) положили начало широкому использованию магнитных систем ориентации. Для создания управляющего момента в магнитных системах используется взаимодействие собственного (постоянного<sup>8</sup> или управляемого<sup>9</sup>) магнитного поля спутника с геомагнитным полем. Такие системы ориентации весьма просты по устройству, но требуют аккуратного расчета алгоритмов управления и динамики спутника. Широко применяются для малых аппаратов<sup>10</sup>.

В целом, малые спутники привнесли много нового в технологию и, что несомненно, — дали возможность самореализоваться большому числу небольших по составу групп исследователей и инженеров, позволили обычным студентам пройти целиком весь путь — от идеи космического аппарата до его запуска и обработки результатов летных испытаний — и все это за время обучения.

Упомянутые выше гравитационные и магнитные системы ориентации являются приложением проведенных при поддержке РФФИ фундаментальных исследований<sup>11</sup>. Эти исследования включают в себя построение математических моделей отдельных элементов систем ориентации и динамических моделей спутников, анализ влияния различных внешних и внутренних факторов, конструирование и выбор номинальных режимов движения спутников относительно центра масс, построение многоэлементных систем, обеспечение их взаимного движения, проработку перспективных схем управления, определение фактического углового движения спутников по результатам измерений как специальных датчиков ориентации, так косвенных измерений бортовой аппаратуры<sup>12</sup>.

Участие в этих и других проектах в части анализа динамики, разработки схем функционирования систем ориентации и управления, алгоритмов управления и идентификации породило задачи, решение которых потребовало проведения обобщающих исследований, тесно примыкающих к фундаментальным проблемам механики космического полета. Эти задачи успешно решаются при поддержке грантов РФФИ (NN 07-01-92001, 06-01-00389, 03-01-00652). Модели и алгоритмы исследуются в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН на лабораторном оборудовании, созданном при поддержке госконтрактов с Федеральным Агентством по науке и инновациям РФ (NN 02.514.11.4086, 02.514.11.4011, 02.434.11.7061, 02.700.12.050, 37.700.11.0141). Развитие материальной

базы и участие в конгрессах Международной астрономической федерации и других научных мероприятиях с докладами о полученных результатах также осуществляется при поддержке РФФИ.

Настоящая статья подготовлена к печати при поддержке гранта РФФИ N 07-01-11509.

---

<sup>1</sup> M. Yu. Ovchinnikov, Russian Launch Opportunities for Small Satellites, *Acta Astronautica*, March 1998, V.43, Issue 11-12, pp.623-629.

<sup>2</sup> Jim Watzin, Observations from over a Decade of Experience in Developing Faster, Better, Cheaper Missions for the Nasa Small Explorer Program, *Acta Astronautica*, 2001, Vol. 48. No. 5-12. pp. 853-858.

<sup>3</sup> М.Ю. Овчинников, В.Д. Шаргородский, В.И. Пеньков, С.А. Мирер, А.Д. Герман, Р.Б. Немучинский. Наноспутник REFLECTOR. Выбор параметров системы ориентации. *Космические исследования*, 2007, т.45, N 1, 67–84.

<sup>4</sup> V. Shargorodsky, V. Shevchenko, M. Ovchinnikov, V. Pen'kov, S. Mirer, R. Nemuchinski, Nanosatellite REFLECTOR for Optical Calibrations: Attitude Control and Determination Aspects, *Advances in Space Research*, July 2002, V.30, Issue 2, pp.337-343

<sup>5</sup> M.Yu. Ovchinnikov, A.A.Ilyin, N.V. Kupriyova, V.I. Penkov, A.S. Selivanov, Attitude dynamics of the first Russian nanosatellite TNS-0, *Acta Astronautica*, 2007, V.61, Issue 1-6, 277–285.

<sup>6</sup> M.Yu. Ovchinnikov, S.O. Karpenko, A.S. Serednitskiy, S.S. Tkachev, N.V. Kupriyanova, Laboratory Facility for Attitude Control System Validation and Testing, Digest of the 6th International Symposium of IAA “Small Satellites for Earth Observation”, 23-26 April, 2007, Berlin, Germany, Paper IAA-B6-0508P, pp.137-140.

<sup>7</sup> G.V. Smirnov, M. Ovchinnikov, A. Guerman, Use of solar radiation pressure to maintain a spatial satellite formation, *Acta Astronautica*, 2007, V 61, Academy Transactions Note, 724 – 728.

<sup>8</sup> М.Ю. Овчинников, В.И. Пеньков. Пассивная магнитная система ориентации наноспутника, *Космические исследования*, 2002, т.40, N 2, с.156-170.

<sup>9</sup> V.A. Bushenkov, M.Yu. Ovchinnikov, G.V. Smirnov, Attitude Stabilization of a Satellite by Magnetic Coils, *Acta Astronautica*, 2002, V.50, Issue 12, pp.721-728.

<sup>10</sup> M.Yu. Ovchinnikov, V. Pen'kov, O. Norberg, S. Barabash, Attitude Control System for the First Swedish Nanosatellite MUNIN, *Acta Astronautica*, 2000, V.46, Issue 2-6, pp.319-326.

<sup>11</sup> М.Ю. Овчинников. Малые спутники и проблемы их ориентации. Современные проблемы прикладной математики. Сборник научно-популярных статей. Под ред. Акад.А.А. Петрова. М.: МЗ Пресс, 2005. С.197-231.

<sup>12</sup> B.V. Rauschenbakh, M.Yu. Ovchinnikov, S. McKenna Lawlor, *Essential Spaceflight Dynamics and Magnetospherics*, Kluwer & Microcosm Publ., 2003, 416p.