
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОСПУТНИКОВ

УДК 629.78
DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-415-422

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ РАЗЛИЧНОГО ЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ АО „РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ“

А. А. РОМАНОВ, А. С. СЕЛИВАНОВ, А. Е. ТЮЛИН

АО „Российские космические системы“, 111250, Москва, Россия,
E-mail: romanov@spacecorp.ru

Рассматриваются особенности разработки технологических наноспутников, создаваемых АО РКС для отработки технологий решения различных целевых задач. Показаны проблемы разработки перспективных технологий космического приборостроения, рассматривается возможность проведения научно-исследовательских технологических работ, компенсирующих разницу в уровнях технологической готовности элементов служебных подсистем и целевой аппаратуры. Предлагается проанализировать отечественные технологии служебных и бортовых радиотехнических систем малоразмерных космических аппаратов с целью выхода на качественно новый уровень выполнения проектно-конструкторских работ. Для этого необходимо восстановить понятие научно-исследовательских технологических работ и обеспечить их включение как в федеральную космическую, так и в другие федеральные целевые программы. Представлены результаты работы по созданию различных полезных нагрузок, предназначенных для размещения на наноспутниках формата CubeSat.

***Ключевые слова:** космическое приборостроение, малоразмерные космические аппараты, научно-образовательные спутники, радиозатменное зондирование атмосферы, радиотомография ионосферы, спутниковая автоматическая идентификационная система*

Введение. В 2015 году исполнилось 10 лет со дня запуска первого технологического наноспутника ТНС-0 № 1, разработанного в АО „Российские космические системы“ (АО РКС). Несмотря на относительную простоту и малый вес (менее 5 кг) изделия, на ТНС-0 № 1 удалось отработать целый ряд технологий и систем: новые принципы управления проектами создания изделий ракетно-космической техники, однопунктовое управление КА через космическую систему ГЛОБАЛСТАР, новые образцы датчиков Солнца и горизонта, а также произвести сертификацию радиобуев системы КОСПАС-САРСАТ и пр. В пленарном докладе, представленном на 10-м международном симпозиуме по малым спутникам (апрель 2015 г.) профессор Мартин Свитинг со ссылкой на компанию Евроконсалт отметил, что в ближайшее десятилетие из 1150 КА, по крайней мере, 375 будут предназначены для решения задач дистанционного зондирования Земли (из них 60 % будут относиться к так называемым малоразмерным космическим аппаратам) [1].

В начале 2000 гг. в АО РКС изучались возможности создания нескольких вариантов малоразмерных КА (МКА) нанокласса. Первый технологический наноспутник типа ТНС-0 № 1 всего за один год был разработан и изготовлен, его запуск с борта МКС состоялся в марте 2005 г. [2]. Таким образом было положено начало принципиально новому подходу в космическом приборостроении: использованию „спутников-приборов“ [3]. Требования к технологическим спутникам принципиально отличаются от требований к серийным космическим аппаратам, прежде всего потому, что основная задача технологического МКА — получение летной квалификации разработанных технологий и подтверждение достижения ими уровня технологической готовности (Technology Readiness Level) TRL6 путем демонстрации работоспособности в реальных условиях космического пространства. Требования по сроку активного существования существенно мягче, поскольку для получения летной квалификации достаточно демонстрации возможностей аппаратуры от нескольких месяцев до одного года. Так, в работе [4] представлены результаты летных испытаний МКА TechDemoSat (вес 150 кг) разработки английской компании SSTL.

Поскольку срок разработки космических аппаратов нанокласса укладывается в календарный год, на них можно отработать несколько технологий, обеспечив необходимый для испытания срок активного существования МКА на низкой околоземной орбите, не создавая экологических проблем, связанных с засорением космического пространства.

В предлагаемой статье рассматриваются особенности разработки технологических наноспутников, создаваемых АО РКС для отработки технологий решения различных целевых задач. Показаны проблемы разработки перспективных технологий космического приборостроения, рассматривается возможность проведения научно-исследовательских технологических работ, компенсирующих разницу в уровнях технологической готовности элементов служебных подсистем и целевой аппаратуры.

Динамика развития общества требует поиска новых путей разработки и создания космических средств, применяемых сегодня для решения многочисленных народно-хозяйственных задач (рис. 1). Средние сроки разработки МКА уменьшились с 10—15 лет (в 1990 г.) до 2—5 лет. Динамика изменения жизненного цикла инновационного продукта требует новых образовательных подходов, в том числе перехода к „непрерывному образованию“, с целью подготовки специалистов, в частности разработчиков МКА, высокого уровня.

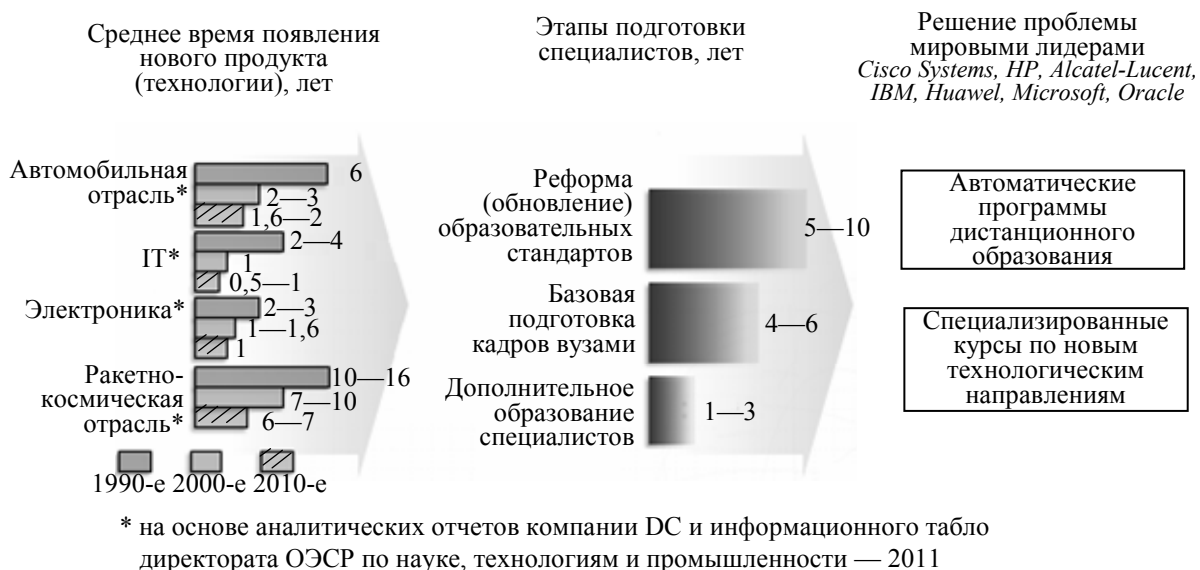


Рис. 1

Переход к реализации концепции „спутник-прибор“ потребовал:

- расширения сферы научно-технической и коммерческой деятельности;
- стимулирования работ по миниатюризации бортовых приборов и систем;

- стимулирования разработки и ускорения внедрения перспективных технологий управления КА и передачи данных;
- интеграции в мировое сообщество разработчиков перспективной космической техники;
- содействия подготовке молодых специалистов и научных кадров высшей квалификации.

Главные ограничения в программе создания МКА в АО РКС состояли в том, что срок реализации проекта был лимитирован 1—2 годами при обязательной минимизации затрат на создание МКА и выведение их на орбиту. Исходя из этих ограничений был выбран нанокласс спутниковой платформы, поставлена задача создания в несколько этапов линейки МКА с ограниченным набором выполняемых функций. С использованием мирового опыта создания университетских МКА в АО РКС заложены следующие принципы проектирования и разработки:

- использование для комплектации МКА высокотехнологичных широкодоступных изделий коммерческого производства;
- использование глобальных телекоммуникационных сетей и стандартов для управления КА и передачи данных;
- использование систем контроля космического пространства СККП (Россия) и НОРАД (США) для траекторных измерений, наряду с применением встроенной аппаратуры спутниковой навигации;
- использование нетрадиционных конструкционных материалов;
- разработка простых систем ориентации и стабилизации КА по геомагнитному полю;
- интеграция функций по обработке командно-программной и телеметрической информации непосредственно на борту МКА.

Следование указанным принципам позволило при первом полете ТНС-0 №1:

- обеспечить успешный запуск МКА с борта МКС „ручным способом“;
- экспериментально подтвердить, что технические характеристики спутниковой системы связи ГЛОБАЛСТАР позволяют использовать ее для управления полетом МКА, с учетом технологических особенностей ее функционирования (наличие большого числа зон обслуживания региональных операторов со строгим контролем нахождения абонента в зоне, реальное количество активных МКА в группировке и др.);
- продемонстрировать возможность использования системы КОСПАС-САРСАТ в условиях открытого космоса (установленный на наноспутник радиобуй АРБ-ТНС функционировал как резервное средство контроля работоспособности наноспутника);
- показать эффективность применения пассивной магнитной системы ориентации в составе МКА нанокласса, поскольку реальное время успокоения (68 сут.) было в 1,5 раза меньше прогнозируемого (90 сут.);
- подтвердить, что методы обеспечения теплового режима были выбраны правильно. Температура внутри МКА находилась в пределах от -15 до $+14$ °С, что удовлетворяет требованиям ТЗ (от -30 до $+50$ °С);
- подтвердить правильность решений, заложенных в ПО системного контроллера. Работа в режимах 1 („периодический выход на связь“), 2 („сбор ТМИ с заданным интервалом“) и 3 („выход на связь в заданное время“) прошла успешно;
- подтвердить основные параметры датчиков Солнца и горизонта, несмотря на то что датчик Солнца на базе фоточувствительного элемента из технического алмаза был откалиброван со значительной ошибкой и работал на пороге чувствительности.

Таким образом, наземные испытания систем и центра управления полетом ТНС-0 проведены успешно, проверена в реальных условиях и подтверждена работоспособность специального программного обеспечения ЦУП ТНС-0.

Такие результаты летных испытаний наноспутника позволили продолжить разработку усовершенствованной линейки МКА ТНС-0 № 2, 3 и 4. При этом на ТНС-0 № 2 предполагается продолжить отработку технологии управления КА через глобальные телекоммуникационные сети при проведении летного эксперимента на борту МКС.

Основные отличия ТНС-0 № 2 от ТНС-0 № 1 включают в себя:

- наличие солнечных батарей и аккумулятора (у № 1 одноразовая литиевая батарея);
- установка дополнительной антенны системы глобальной спутниковой связи ГЛОБАЛСТАР для обеспечения сферической диаграммы направленности, повышающей надежность связи с МКА;
- установка дополнительного приемопередатчика команд и программ, работающего в УКВ-диапазоне, для резервирования канала управления МКА;
- введение режима пакетной передачи данных и информации через Интернет (это повышает надежность связи);
- установка приемника автономной спутниковой навигации собственной разработки;
- установка нового бортового процессора для обеспечения пакетного режима передачи данных и новых режимов управления МКА;
- конструкция солнечного датчика на базе УФ-фотоприемника, изготовленного из технического алмаза;
- конструкция датчика горизонта;
- установка магнетометра для уточнения ориентации МКА;
- матобеспечение для управления МКА.

На рис. 2 представлены состав и сроки выполнения скоординированных НИОКР, направленных на концептуальную разработку и создание перспективных комплексов и систем на базе наноспутников.

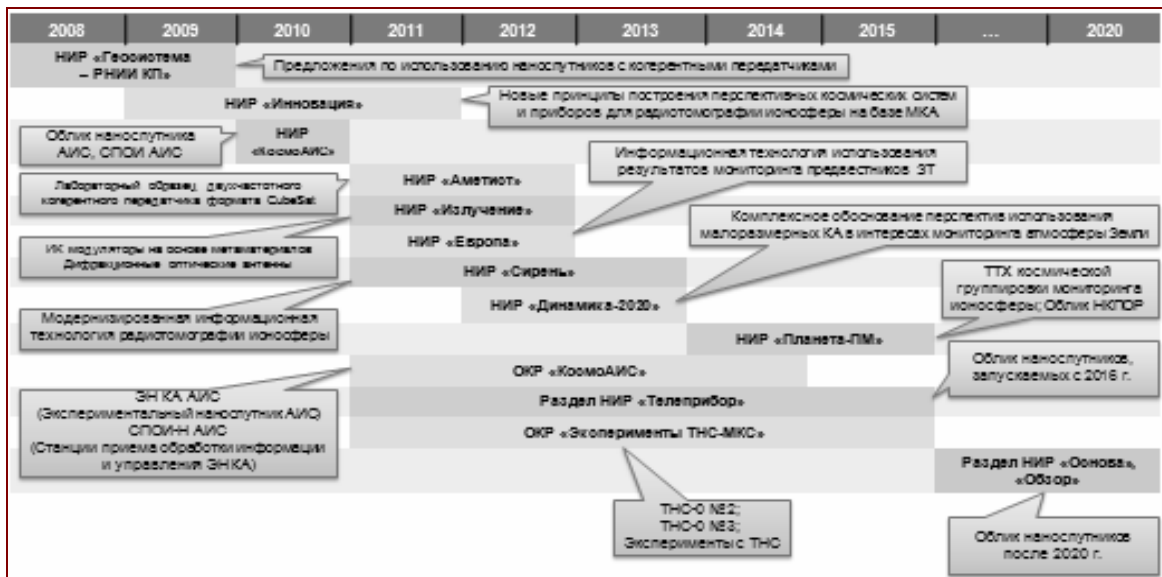


Рис. 1

В АО РКС были проведены комплексные системные исследования, направленные на разработку: перспективных космических систем радиозатменного зондирования атмосферы, принципов построения перспективных космических систем и приборов для радиотомографии ионосферы на базе МКА и предложений по использованию наноспутников с когерентными передатчиками. Результаты исследований опубликованы в работах [5—8].

Предложенные технические решения были использованы при разработке методологии и информационной технологии диагностирования ионосферных предвестников землетрясений, а также при создании наземной сети приемных станций сигналов когерентных передатчиков, реализующих спутниковую радиотомографию ионосферы [8—11].

В АО РКС был реализован проект „КосмоАИС“ по созданию технологии мониторинга надводных объектов с использованием сигналов автоматической идентификационной системы (АИС) [12]. Менее чем за три года была разработана замкнутая технология, позволявшая проводить летные испытания аппаратуры, обеспечивающей прием информации АИС на борту космического аппарата, ее передачу на наземные станции, обработку и предоставление мониторинговой информации потенциальным потребителям услуги [13—15]. В работе [15] представлены первые результаты работы технологии на борту космического аппарата „Ресурс-П“ № 2, а также проанализированы перспективы совместного использования данных АИС и информации дистанционного зондирования, а также запуска космического аппарата нанокласса „КосмоАИС“.

При выполнении всего комплекса работ в АО РКС выявлена серьезная системная проблема развития направления космического приборостроения и ракетно-космической отрасли в целом. Дело в том, что жизненный цикл разработки и создания новых образцов космической техники в основном финансово поддерживается в рамках НИР и ОКР, обеспечивающих реализацию уже поставленных задач. При этом разработке собственно новых, в том числе критических, технологий уделяется недостаточное внимание. Это часто приводит к тому, что разработчики вынуждены доводить несовершенные технологии в рамках выполняемых ОКР, что приводит к повышению расходов и увеличению сроков разработки.

Вместе с тем подходы системного инжиниринга [16], предписывающие проведение оценки технологической готовности применяемых технологий, требуют, чтобы в ОКР использовались технологии с TRL не ниже 6. В работе [7] выполнен обзор состояния разработки зарубежных технологий служебных и бортовых радиотехнических систем малоразмерных космических аппаратов (см. таблицу).

Уровень технологической готовности элементов МКА

Элемент	Описание	Страна-производитель	TRL
Солнечные батареи	Улучшенное тройное соединение, эффективность 27 %	США, Германия, Англия	9
Аккумуляторы	Ag-Zn, SZHR50, 0.76kg, 1.5 V, 50 Ahr; Li-Ion, поставляется из COTS космической квалификации	США, Франция/США, Япония	6
Перспективные источники питания	Термоэлектрические, пьезоэлектрические, радиоизотопные	США, Канада	6, 5, 2
Микродвигатели на холодном газе	MPS, n-Butane, 0.01N Isp 69 sec; 58E143/144/145/146Nitrogen, 0.016-0.04 N Isp 65 sec	США, Англия	7, 9
Маховики	Одноосные, трехосные	Англия, Германия, США	9, 8, 7
Магнитные катушки	С дублированием	Германия, Англия	9
Солнечные датчики	Высокоточные звездные датчики для микроспутников	Англия, Германия, Дания, США	7—9
Гироскопы	Трехосевой инерциальный датчик с магнетометром для нано- и пикоспутников (BI = 25,2 град/ч)	Германия, США, Япония	7—9
GPS-приемники	Миниатюрный приемник с встроенным фильтром Калмана (L1, 1 антенна, 12 каналов, 10 м)	Англия, Германия, Канада, США	7—9
Системы терморегулирования	На основе полиимидной пленки, алюминизированного полиэстра	США	9
Бортовые вычислители и память	8/16/32-разрядные микропроцессоры; твердотельная память объемом 16 ГБ	Англия, Дания, Германия, США, Швейцария, Япония	9

Следует отметить, что практически все элементы могут использоваться в ОКР по созданию новых КА. Более того, большинство рассмотренных технологий коммерчески доступны.

Представляется целесообразным провести подобный анализ и для отечественных технологий, что позволит выйти на качественно новый уровень выполнения проектно-конструкторских работ. Для этого необходимо восстановить понятие научно-исследовательских технологических работ и обеспечить их включение как в федеральную космическую, так и в другие федеральные целевые программы.

Выводы. В статье обсуждаются вопросы, связанные с разработкой перспективных технологий космического приборостроения, основанных на использовании МКА нанокласса. Показано, что подобные аппараты идеально подходят для реализации технологических спутников, обеспечивающих отработку новых технологий и получение летной квалификации бортовой аппаратуры.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволяют разрабатывать космические системы различного назначения, в частности „Радиомет“ на базе наноспутников, обеспечивающей получение высотных профилей температуры, влажности, а также электронной концентрации атмосферы и ионосферы с использованием принципов затменного зондирования.

Представлены результаты работы по созданию различных полезных нагрузок, предназначенных для размещения на наноспутниках формата CubeSat. Предложенные в АО РКС методические подходы к решению задач определения абсолютного полного электронного содержания ионосферы могут быть использованы при создании перспективных космических систем мониторинга опасных природных явлений.

Анализ результатов летных испытаний бортового радиоконкомплекса регистрации сигналов автоматической идентификационной системы судов (БРК АИС) в составе КА „Ресурс-П“ № 2 убедительно подтвердил его готовность к целевому применению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sweeting M.* Will entrepreneurs change the face of the EO space industry? // 10th Symp. on Small Satellites. Berlin, April 2015.
2. *Селиванов А. С.* Разработка и летные испытания первого российского технологического наноспутника ТНС-0 № 1 // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2, вып. 2. С. 74—90.
3. *Романов А. А., Романов А. А., Урличич Ю. М., Буравин А. Е.* Концептуальные подходы к созданию перспективных космических систем // Перспективные компьютерные системы: устройства, методы и концепции: Труды семинара. Таруса, 2—4 марта 2011. М.: Ин-т космических исследований РАН, 2011. С. 92—104.
4. *da Silva Curiel A., Liddle D., O'Donovan V., Unwin M., Sweeting M.* First results from UK TechDemoSat-1 Spacecraft // Proc. of 10th Symp. on Small Satellites. Berlin, April 2015. P. 8.
5. *Selivanov A., Romanov A., Vishnyakov V., Vinogradov A., Pavelyev A., Yakovlev O.* Concept of space system for global radio occultation monitoring of lower atmosphere and ionosphere based on super-small satellites with GLONASS/GPS navigation signal receivers // European Space Agency Symp. on Space Applications “Space Tools and Solutions for Monitoring the Atmosphere and Land Cover”. Graz, Austria, September 9—12, 2008.
6. *Selivanov A., Romanov A., Vishnyakov V., Vinogradov A., Selin V., Pavelyev A., Yakovlev O., Matyugov S.* Space system “Radiomet” for GLONASS/GPS navigation signal radio occultation monitoring of lower atmosphere based on super small satellites // Small Satellite Missions for Earth Observation — New Developments and Trends. Berlin—Reidelberg: Springer, 2010.
7. *Романов А. А., Романов А. А., Урличич Ю. М.* Томографические исследования ионосферы Земли с использованием кластера малоразмерных космических аппаратов // Тр. Междунар. науч. конф. MEDIAS'2011. М.: ИФТИ, 2011. С. 47—57.

8. *Tramatolli V., Filizoola C., Inan S., Jakowsky N., Pulinets S. et al.* Pre-Earthquakes: Processing Russian and European Earth Observations for earthquake precursor studies // European Commission. Let's Embrace Space. Luxemburg Publication Office of the European Union, 2012. Vol. II. P. 254—262.
9. *Романов А. А., Трусов С. В., Романов А. А., Барабошкин О. И., Бобровский С. А.* Двумерная радиотомография ионосферы: существующие и перспективные технологии // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 169—172.
10. *Романов А. А., Барабошкин О. И., Трусов С. В., Романов А. А.* Наклонная двумерная фазоразностная радиотомография ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 249—258.
11. *Романов А. А., Романов А. А., Трусов С. В., Урличич Ю. М.* Спутниковая радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 296 с.
12. *Romanov A. A., Romanov A. A., Makarov Y. N.* Russian technologies of monitoring and remote sensing using nanosatellites // Proc. of the 64th Intern. Astronautical Congress (IAC 2013). Beijing, China, Sept. 23—27, 2013. Paper: IAC-13.B4.4.9.
13. *Kuznetsov A. M., Romanov A. A.* The probability of ship with AIS transponder detection at the northern and eastern sea borders of Russian Federation // Small Satellites for Earth Observation. Missions&Technologies Operational Responsive Space Commercial Constellations. IAA Book Series. 2014. Vol. 1, N 4. P. 91—99.
14. *Романов А. А., Романов А. А., Кузнецов А. М.* Мониторинг судов из космоса: космический сегмент АИС. Результаты, перспективы развития // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 4. С. 64—72.
15. *Romanov A. A., Romanov A. A., Tyulin A. E.* Small satellites for vessels and airplanes monitoring in JSC "Russian Space Systems": status and perspectives // Proc. of 10th IAA Symp. on Small Satellites. Berlin, April 2015. 8 p.
16. *Романов А. А.* Прикладной системный инжиниринг. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 556 с.
17. Small Spacecraft Technology State of the Art, NASA report NASA/TP-2014-216648/REV1, 2014 [Электронный ресурс]: <http://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Small_Spacecraft_Technology_State_of_the_Art_2014.pdf>.

Сведения об авторах

- Алексей Александрович Романов* — д-р техн. наук, профессор; АО „Российские космические системы“; дирекция; заместитель генерального директора по науке; E-mail: romanov@spacecorp.ru
- Арнольд Сергеевич Селиванов* — д-р техн. наук, профессор; АО „Российские космические системы“; экспертно-аналитический центр; начальник экспертно-аналитического центра; E-mail: selivanov@spacecorp.ru
- Андрей Евгеньевич Тюлин* — канд. техн. наук, профессор Академии военных наук; АО „Российские космические системы“; дирекция; генеральный директор; E-mail: contact@spacecorp.ru

Рекомендована межвузовской
кафедрой космических исследований

Поступила в редакцию
14.11.2015 г.

Ссылка для цитирования: *Романов А. А., Селиванов А. С., Тюлин А. Е.* Перспективы разработки малоразмерных космических аппаратов различного целевого назначения АО „Российские космические системы“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 6. С. 415—422.

PERSPECTIVES OF SMALL SIZE SPACECRAFT DEVELOPMENT FOR VARIOUS PURPOSES AT JSC RUSSIAN SPACE SYSTEMS

A. A. Romanov, A. S. Selivanov, A. E. Tyulin

*JSC Russian Space Systems, 111250, Moscow, Russia
E-mail: romanov@spacecorp.ru*

In 2015, 10 years since the launch of the first technological nanosatellite TNS-0 N1 developed by JSC Russian Space Systems (JSC RSS) was marked. Despite the relatively simple structure and small size of TNS-0 N1 (total weight was less than 5 kg), it was successfully used as a platform for testing a number of new technologies and systems modern at that time: new principles to be applied for the purpose of rocket and space equipment development, single-point control of a satellite via space system GLOBALSTAR, new samples of Sun and horizon sensors, as well as certification of COSPAS-SARSAT beacons, etc. The paper

presents JSC RSS experience in nanosatellites development, as well as concepts of a number of technologies and nanosatellite systems suitable for pilot projects implementation. Several problems of development of perspective technologies of space instrument manufacturing are discussed, the possibility of carrying out scientific research and technological works compensating the difference in levels of technological readiness of elements of the service subsystems and the target hardware is considered. It is proposed to perform an analysis of domestic technology service and on-board radio systems for small spacecraft with the objective of achieving a qualitatively new level of implementation of design works. The necessity to restore the concept of scientific-technological research works and their inclusion in the Federal Space Program, and in other Federal target programs is declared. Results of the works on creation of various useful loadings intended for placement on the nanosatellites of CubeSat format are presented.

Keywords: space instrument manufacturing, nanosatellites, scientific and educational satellites, atmosphere radio occultation, ionosphere radio tomography, satellite automatic identification system

Data on authors

- Alexey A. Romanov** — Dr. Sci., Professor; JSC Russian Space Systems; Deputy General Director for R&D; E-mail: romanov@spacecorp.ru
- Arnold S. Selivanov** — Dr. Sci., Professor; JSC Russian Space Systems, Expert-Analytical Center; Head of the Center; E-mail: selivanov@spacecorp.ru
- Andrey E. Tyulin** — PhD; JSC Russian Space Systems; General Director; Academy of Military Sciences, Professor; E-mail: contact@spacecorp.ru

For citation: Romanov A. A., Selivanov A. S., Tyulin A. E. Perspectives of small size spacecraft development for various purposes at JSC Russian Space Systems // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 6. P. 415—422 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-415-422