

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 620.783.112:621.396

МОНИТОРИНГ ДИНАМИКИ ПЛОТНОСТИ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ГРУППИРОВКАМИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. В. Карелин, Ю. А. Кузьмин,
В. А. Шувалов, А. А. Яковлев

Рассматриваются особенности изменений плотности верхних слоев атмосферы (эффект «уплотнения» атмосферы) в условиях воздействия факторов гелиогеофизической обстановки и возможного влияния на космическую деятельность. Обосновывается необходимость выявления причин и характера этих изменений и показана практическая потребность в создании цифровой ассимиляционной модели плотности верхней атмосферы и прогнозирования состояния и динамики этой среды. Разработан проектный облик малого КА (МКА) в формате «спутник-прибор» для непрерывных измерений локальных параметров плотности верхней атмосферы (ВА) в процессе орбитального движения МКА до завершения полёта. Предложен вариант низкоорбитальной космической системы мониторинга на базе группировок малых КА для получения количественных данных о характерных особенностях изменений плотности и разработке динамической модели верхней атмосферы.
Ключевые слова: гелиогеофизика, плотность верхней атмосферы, орбитальная группировка, МКА, «спутник-прибор», микро-спутник, тепловой баланс, мультипарная группировка, система мониторинга, особенности изменений плотности.

В проблеме изучения среды обитания (природной среды) важной составляющей исследований является околоземное космическое пространство (ОКП), верхняя атмосфера, ионосфера, магнитосфера [1]. Именно здесь функционируют космические аппараты, работают космонавты, проходят радиотрассы, мощные потоки солнечной энергии, поступающие через атмосферу на земную поверхность в форме электромагнитного и корпускулярного излучений. Обладая высокой подвижностью и чувствительностью, параметры верхней атмосферы (ВА) и ионосферы могут изменяться на порядки, в зависимости от внешних (по отношению к ВА) воздействий. Так, например, плотность верхней атмосферы в зависимости от времени суток может изменяться на 2 – 3 порядка.

Изменчивость характеристик верхней атмосферы носит нерегулярный, стохастический характер. Поэтому в расчетах режимов функционирования КА на орбите принимают усредненные модели ОКП. Уточнение моделей и организация оперативного мониторинга параметров атмосферной среды является актуальной научно-технической и практической задачей.

Исследования баллистических характеристик низкоорбитальных КА за несколько десятилетий, выполненные в нашей стране, в США и других странах, позволили выявить устойчивый тренд в изменении плотности верхней атмосферы по типу «оседания». Возможно, что этот эффект связан с какими-то нерегулярными и природными циклами колебаний плотности, вызванными пока непонятными механизмами. Кроме того, выполненные в последнее время ряд экспериментальных и теоретических работ выявили воздействие на верх-

ние слои атмосферы нестационарных орографических волн, возникающих в нижних слоях атмосферы при взаимодействии воздушных потоков земной атмосферы с рельефом земной поверхности. Первые результаты о влиянии этого эффекта на пространственное распределение электронной концентрации слоя F2 были представлены в работе [2]. Позднее, на основе данных наземных спектрофотометрических измерений температуры верхней атмосферы, полученных в обсерваториях в различных частях земного шара, была сделана количественная оценка потока волновой энергии, транспортируемой в верхнюю атмосферу, за счет орографического эффекта. Величина этого потока оказалась сопоставимой с энергией УФ солнечного излучения, поглощаемого атмосферой у основания термосферы [3].

Целью настоящего исследования является попытка зарегистрировать эти эффекты и получить мониторинговые данные, подтверждающие существование устойчивого тренда в изменении плотности верхней атмосферы, а также обосновать глобальную картину пространственного распределения орографического эффекта, оказывающего существенное влияние на пространственное распределение неоднородностей характеристик верхней атмосферы (температура, плотность, собственное свечение, волны и т. д.).

Таким образом, настоящая работа направлена на разработку методологии космических исследований динамики плотности ВА на основе малых КА и построения измерительного инструмента регистрации параметров верхней атмосферы для получения надежных количественных данных, подтверждающих существование устойчивого тренда изменений параметров плотности этой среды в условиях внеш-

них воздействий. Кроме того, в статье рассматривается низкоорбитальная структура и облик космической системы мониторинга ВА.

Справка по состоянию исследований верхней атмосферы

Исследования верхней атмосферы (ионосферы, магнитосферы) начались более 100 лет назад, когда появились первые необходимые для этого средства (воздушные шары, дирижабли, самолеты, и др.), а также разработана соответствующая измерительная аппаратура. Это направление было продиктовано не столько практической необходимостью, сколько потребностью в расширении знаний о среде обитания и физической природе наблюдаемых явлений. Экспериментальные исследования выполнялись с помощью измерительных средств, установленных на воздушных шарах, дирижаблях, метеорологических ракетах, которые используются до настоящего времени. Получены данные о падении давления и плотности с высотой, определен ход температурной зависимости, которая носит нелинейный характер [4], а также о составе ВА и ее ионизированной компоненты и др. Однако с развитием космонавтики представление о физических процессах и состоянии верхней атмосферы приобретает характер практической необходимости. И связано это с тем обстоятельством, что в этой среде функционируют различные технические объекты. Более того, структура и комплекс геофизических процессов в ВА выполняет роль граничных условий для протекающих гидрометеорологических процессов в нижней атмосфере (тропосфере). Однако и на сегодня инструментальных данных о состоянии ВА крайне ограниченное количество в силу трудной доступности этой среды для измерительных средств. Развитие космической техники позволило получить дополнительную информацию о волновых процессах, светимости, акустике, механизмах ионизации и т. д., но этого недостаточно, чтобы обоснованно утверждать о заметном влиянии ВА на гидрометеорологические процессы в тропосфере.

В настоящее время разработаны модели верхней атмосферы, которые используются в баллистических расчетах параметров движения и управления КА [5]. Повышение требований к точности прогнозирования характеристик движения КА приводит к необходимости регулярно уточнять модели верхней атмосферы, для чего используются разнообразные космические средства, в том числе ресурсы Международной космической станции, и в последние несколько лет в этом направлении выполнены космические эксперименты (КЭ): «Вектор-Т» (в рамках КЭ

«Среда-МКС»), «Сфера», «Радиоскаф», «Наноспутник», «Микроспутник» [6]. По результатам указанных экспериментов уточнялись модели верхней атмосферы, выполнялась калибровка аппаратуры, наблюдалась эволюция движения пассивных спутников шаровой формы (КЭ «Вектор-Т») в условиях влияния сопротивления верхней атмосферы, но координаты спутника, при этом, определялись наземными средствами.

Точность этих наблюдений невелика в связи с большим периодом осреднения на наземных радиотехнических комплексах контроля космического пространства. Поэтому перечисленные КЭ не могли дать информацию о плотности верхней атмосферы и механизмах, вызывающих её изменение. Более того, в указанных КЭ эта задача не ставилась.

Методология исследований плотности верхней атмосферы

Для наблюдения характера изменения параметров плотности и получения данных по эффекту уплотнения ВА, а также определения физических закономерностей изменения плотности, воспользуемся известным методом «падающих сфер», который заключается в наблюдении эволюции пассивных сфер в ВА наземными средствами.

В настоящей работе в качестве первичного преобразователя-датчика предлагается использовать малые КА сферической формы в формате «спутник-прибор», обтекание которого набегающим потоком не зависит от ориентации спутника и является симметричным при движении шара в ВА. Точное позиционирование КА позволит определять падение скорости, воспроизводить орбиту полёта и действующую на шар силу сопротивления среды, а следовательно, ее плотность. Такой КА будет одновременно целевой измерительной аппаратурой, подробная пространственно-временная характеристика его движения и параметры внешних факторов, воздействующих на верхнюю атмосферу, ионосферу, магнитосферу, позволяют получить необходимую информацию об изменении плотности геофизических сред ВА. Эта методология позволит определять текущее состояние и данные по уточнению моделей коротко- и длиннопериодических изменений плотности ВА, волновых движений, структуры гравитационного поля по результатам высокоточных измерений орбитальных параметров сферического КА (с датчиком гравитации) и полного цифрового отображения его траектории в условиях пассивного полета.

Наличие сферы предполагает, что на КА «спутник-прибор» будут действовать только гравитационная и газодинамическая сила сопротивления

среды, при этом воздействие корректирующих и управляющих двигателей исключается и, следовательно, сферический малый КА должен функционировать без силовых установок, то есть в упрощенном конструктивном варианте.

КА сферической формы можно запустить с борта МКС или транспортно-грузового корабля «Прогресс» (предварительно подняв орбиту до высоты 500 км) (см. рис. 1), геофизической ракетой или дополнительной нагрузкой к плановым пускам, а далее он будет совершать пассивный полет до полной выработки ресурса и входа в плотные слои атмосферы. В результате будет получена информация, необходимая для уточнения динамической модели плотности верхней атмосферы, оперативные данные для баллистических расчетов, что актуально также в связи с многочисленными КА в ОКП.

В процессе проведения исследований предполагается отработать в натуральных условиях технику и технологию малых КА [7, 8], заложенных в реализацию проекта, что приведет к созданию инструмента для исследования и мониторинга плотности ВА высокого разрешения, потребность в котором испытывают не только геофизики.

Научная аппаратура и особенности реализации исследований

В качестве научной аппаратуры используется собственно малый КА «спутник-прибор». Реализация осуществляется после разработки, изготовления, а также испытания научной аппаратуры (НА), которая выполнена в виде автономного малого КА (МКА) сферической формы, предназначенного для высокоточных измерений плотности верхней атмосферы в процессе пассивного полета по баллистической траектории от запуска до входа в плотные слои атмосферы, а также для определения структуры гравитационного поля и передачи получаемой информации на приемные наземные средства. Шаровая оболочка КА будет выполнена в форме оптически- и радиопрозрачной сферы $D \approx 700$ мм, внутри которой устанавливается микроспутник без реактивных устройств, изменяющих траекторию центра масс и общей массой ~ 5 кг, имеющий связь, электропитание и устройство для высокоточного определения пространственно-временных координат в процессе пассивного полета (рис. 2).

На спутник будет действовать только гравитация и сопротивление набегающего потока. Реактивные двигатели микроспутника отсутствуют. Поскольку спутник сферической формы, бортовой комплекс управления (БКУ) может иметь магнитную или инерциальную систему ориентации и стабилизации.



Рис. 1. Запуск микроспутника с борта МКС членами экипажа Ю. Маленченко и Г. Падалкой во время выхода в открытый космос 20 августа 2012 года

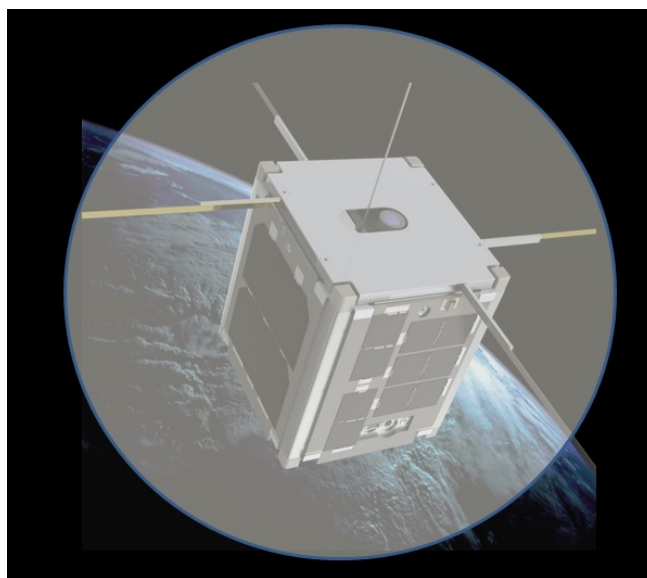


Рис. 2. КА типа кубсат, заключенный в оптически- и радиопрозрачную сферу

Поворот сферического спутника относительно центра масс не оказывает влияния на измерения (и характер обтекания). Таким образом, на малый сферический КА (который фактически является измерительным инструментом) будут действовать силы тяготения и сопротивления среды, он будет двигаться по баллистике с постепенным снижением. Измеряя положение сферически симметричного КА аппаратурой спутниковой навигации (которая будет в составе микроспутника), возможно с достаточной точностью определить плотность верхней атмосферы по траектории полета.

Возможности реализации научной аппаратуры

Научная аппаратура для определения состояния параметров плотности ВА, физических условий и

динамики верхней атмосферы будет реализована на базе существующих МКА (типа кубсат), компонентов и технологий, то есть разработанное системотехническое решение должно обеспечивать высокое качество измерений, а также решение задач для достижения заявленных целей. Аппаратура должна включать оптически- и радиопрозрачную сферу, с целью обеспечения симметрии обтекания набегающим потоком среды при любой ориентации, внутри которой устанавливается наноспутник с высокоточной системой позиционирования (определения пространственно-временных координат) МКА на траектории полета. Кроме того, наноспутник должен иметь систему электроснабжения, систему обеспечения теплового режима, систему связи, блок накопления и передачи данных, устройство стабилизации. Поскольку спутник имеет сферическую форму, бортовой комплекс управления (БКУ) может иметь магнитную или инерциальную системы ориентации и стабилизации. Поворот сферического спутника относительно центра масс не оказывает влияния на измерения и характер обтекания, но реактивные двигатели будут исключены из конструкции спутника. Доступ к внутренней системе (внутри шара) только по каналам связи. Собранная научная аппаратура должна пройти серию предполетных испытаний по упрощенной схеме.

Информативность мониторинга плотности верхней атмосферы

Выше показана актуальность и необходимость исследования изменчивости плотности и динамики ВА. В настоящее время, несмотря на некоторые успехи в приборостроении и систематические наблюдения, не разработано сколько-нибудь стройной теории изменений плотности ВА и прогнозирования её динамики. Это понятно, поскольку ВА обладает сложной структурой, высокой чувствительностью и подвижностью, и регулярно подвержена внешним воздействиям различной природы (солнечное, космические лучи, геомагнитное, электромагнитное, орографическое, антропогенное и др.), проявления которых не всегда очевидны. В таких условиях изучение распределения плотности ВА является важной и актуальной задачей. В этом плане рассмотренный выше КА «спутник-прибор» как космическая аппаратура (индикатор плотности) для прямых измерений будет конструктивно простым, но полезным исследовательским инструментом для решения задач изменчивости состояния ВА. Но получение данных о структуре плотности этой масштабной, непрерывной и неоднородной среды одиночным прибором невозможно. Данные измерений для анализа обстановки

необходимо получать в достаточном количестве, согласованные, из различных пространственных областей ВА и времени суток, то есть в идеале в планетарном масштабе. Поэтому ниже рассмотрим более эффективный инструмент, а именно космическую систему мониторинга изменчивости и динамики параметров плотности ВА, построенную на базе мультипарных группировок МКА сферической формы – как индикаторов плотности набегающей среды ВА.

Мультипарная группировка в космической системе при высокоточном пространственно-временном геопозиционировании МКА на орбите откроет возможность регистрации относительного смещения КА, что приведет к определению потенциала и градиентов поля гравитации в локальных областях функционирования таких индикаторов, расположенных в одной или смежных орбитальных плоскостях. Таким образом, сформулированная цель может быть достигнута системой мониторинга ВА на основе группировки шаровых МКА – индикаторов плотности ВА.

Структура системы мониторинга изменений плотности верхней атмосферы на основе группировок малых КА

Цель создания космической системы мониторинга плотности ВА – регулярное получение согласованных количественных данных о состоянии и структуре параметров плотности верхней атмосферы по контактными измерениям низкоорбитальных мультипарных группировок малых КА.

Структура измерений космической системой мониторинга является достаточно простой. Непрерывно измеряются пространственно-временные параметры сферического МКА (спутника-индикатора) по траектории полёта до входа в плотные слои атмосферы. Скважность измерений 10 с. Также непрерывно измеряется потенциал гравитационного поля Земли.

Состав целевой аппаратуры и требования к размещению приборов. Каждый сферический МКА является целевым прибором. Требования к МКА внутри сферы – непрерывное определение собственных пространственно-временных параметров на орбите, то есть высокоточная аппаратура спутниковой навигации (АСН) в составе МКА. Блок накопления данных (БНД) формирует данные в течение 2 – 4 суток, передаёт в радиолинию и сбрасывает на Землю (возможно через ретранслятор). Потенциал гравитационного поля возможно определить по данным о параметрах или дополнить МКА гравиметром в качестве целевой аппаратуры.

Таким образом, состав целевой аппаратуры МКА включает:

– высокоточную аппаратуру спутниковой навигации;

Таблица

Мультипарная группировка		два малых КА «спутник-индикатор»	
Расстояние между КА в группировке		~500 км, то есть время синхронизации измерений составляет 60 – 70 с	
Орбита мультипары спутников		полярная, круговая; начальная высота – 500 км	
Оперативность получения данных		2 – 4 суток (уточняется на этапе проектирования)	
Масса аппаратуры	сфера	0,8 кг	Общая масса МКА-индикатора ~10 – 12 кг
	гравиметр	0,6 кг	
	блок накопления данных (БНД)	2 кг	
	аппаратура АСН	1,2 кг	
	радиолиния передачи данных	1,5 кг	

- высокоточный гравиметр;
- блок накопления данных;
- радиолинию передачи данных.

Из перечисленного видно, что вся аппаратура, кроме высокоточного гравиметра, входит в состав МКА.

Состав и структура баллистического построения мультипарной группировки для мониторинга параметров плотности ВА в таблице.

Система мониторинга из мультипарных группировок выводится на 12 полярных круговых орбит, равномерно распределённых по экватору с шагом два часа. На каждую орбиту выводится две мультипарные группировки со сдвигом 180° . То есть, система мониторинга будет включать 48 МКА «спутник-прибор».

Система связи и передачи информации, структура радиолинии, структура наземного комплекса на этапе построения облика системы остается такой, какая существует для малых КА. Специальные требования – отсутствие реактивных двигателей.

Необходимо обратить внимание на следующие обстоятельства. Предложенный облик космической системы МКА является предварительным. На первых этапах реализации углубленные проектные исследования возможно приведут к уточнению структуры и баллистического построения рассмотренного облика космической системы мониторинга. Срок активного существования системы мониторинга, как измерительного инструмента, ограничивается временем пассивной эволюции МКА-индикаторов до входа в плотные слои атмосферы, то есть около 2 лет. Поскольку такая группировка может использоваться как источник данных о состоянии и прогнозировании развития геофизической обстановки в ВА, космическую систему необходимо обновлять с периодичностью не менее двух лет.

Заключение

Рассмотрена проблема исследования особенностей изменения параметра плотности верхней атмосферы, преимущественно эффект «уплотнения» этой геофизической среды, на который обратили внимание многие специалисты, как в нашей стране, так и за рубежом. Системные исследования пока-

зали, что до настоящего времени нет однозначного объяснения этого явления, которое может быть связано как с перестройкой гелиогеофизических процессов космической погоды, так и воздействием антропогенных факторов. Показано, что изменение плотности ВА оказывает заметное влияние на функционирование космической техники в этой среде, а также гидрометеорологические и климатические процессы в нижней атмосфере.

Предложена методология исследования (мониторинга) изменчивости плотности ВА, основанная на контактных измерениях с использованием МКА сферической формы, где собственно малый КА является чувствительным датчиком или индикатором изменений плотности среды ВА. Показано, что высокоточные непрерывные измерения пространственно-временных характеристик орбитального движения МКА-индикатора аппаратурой АСН позволит получить точные данные для восстановления орбиты и, следовательно, плотности ВА. Обоснована целесообразность включения гравиметра в состав целевой аппаратуры МКА для получения данных о гравитационном потенциале локальной области ВА, где находится МКА.

Обоснован облик сферического МКА-индикатора и на его основе предложена структура космической системы мониторинга особенностей изменений плотности верхней атмосферы, определение текущего состояния, динамики и прогнозирование развития геофизической обстановки ВА.

Литература

1. Авдюшин С. И., Габбасов М. З., Головкин А.В., Журавлев С. В., Селин В. А., Шувалов В. А., Яковлев А. А. Космический сегмент системы мониторинга геофизической обстановки // Космонавтика и ракетостроение, 2010. – № 2(59). – С. 64 – 69.
2. Кессених В. Н., Булатов Н. Д. Континентальный эффект в географическом распределении электронной концентрации слоя F2 // Докл. АН СССР. 1944. – Т. 45. – № 6. – С. 250 – 253.
3. Шефов Н. Н., Семенов А. И., Хомич В. Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структурных и динамических характеристик. – М.: ГЕОС, 2006. – 741 с.

4. Кан С. И. Океан и атмосфера. – М. : Наука, 1982. – 144 с.
5. ГОСТ Р 25645.166-2004. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2004. – 28 с.
6. Карабаджак Г. Ф., Бирюкова Н. С., Лавренко Е. Г., Пеклевский А. В., Репин И. Ю., Российская Е. И., Чикирёв В. Н. Программа научно-прикладных исследований и экспериментов на российском сегменте международной космической станции // В сб. «Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники. Материалы 51-х Научных чтений памяти К. Э. Циолковского», г. Калуга. Издатель Захаров С. И. («СерНа»), 2016. – 496 с.
7. Глазкова И. А. Анализ опыта создания космических систем дистанционного зондирования Земли на базе малых космических аппаратов и тенденции развития российской космической промышленности в этой области // Космонавтика и ракетостроение, 2010. – № 2 (59). – С. 70 – 77.
8. Клюшников В. Ю., Позин А. А., Шершаков В. М., Шувалов В. А., Яковлев А. А. Системные проблемы создания унифицированного ракетного комплекса для пуска малоразмерных космических аппаратов в целях проведения научно-прикладных исследований // Космонавтика и ракетостроение, 2017. – № 6 (99). – С. 23 – 31.

Поступила в редакцию 11.07.2022

Александр Витальевич Карелин, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, т. (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru.

Юрий Александрович Кузьмин, кандидат технических наук, начальник сектора, т. (495) 513-40-88, e-mail: kuzminya@tsniimash.ru.

Вячеслав Александрович Шувалов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 513-49-45, e-mail: vashuvalov@tsniimash.ru.

Александр Александрович Яковлев, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, т. (495) 513-47-44, e-mail: aayakovlev@tsniimash.ru. (АО «ЦНИИМаши»).

MONITORING OF THE DYNAMICS THE UPPER ATMOSPHERE'S DENSITY BY SMALL SPACECRAFT GROUPINGS

**A. V. Karelin, Yu. A. Kuz'min,
V. A. Shuvalov, A. A. Yakovlev**

The features of changes in the density of the upper layers of the atmosphere (the effect of "compaction" of the atmosphere) under the influence of factors of the heliogeophysical situation and possible influence on space activities are considered. The necessity of identifying the causes and nature of these changes is substantiated and the practical need for creating a digital assimilation model of the density of the upper atmosphere and forecasting the state and dynamics of this environment is shown. A design image of a small spacecraft (MC) in the "satellite-instrument" format has been developed for continuous measurements of local parameters of the density of the upper atmosphere (VA) during the orbital motion of the MC until the end of the flight. A variant of a low-orbit space monitoring system based on small spacecraft groupings is proposed to obtain quantitative data on the characteristic features of density changes and to develop a dynamic model of the upper atmosphere.

Keywords: heliogeophysics, upper atmosphere density, orbital grouping, ICA, "satellite-instrument", microsatellite, thermal balance, multi-pair grouping, monitoring system, features of density changes.

References

1. Avdyushin S. I., Gabbasov M. Z., Golovko A. V., Zhuravlev S. V., Selin V. A., Shuvalov V. A., Yakovlev A. A. Space segment of geophysical situation monitoring system // Cosmonautics and rocket engineering, 2010. – No. 2(59). – Pp. 64 – 69.
2. Kessenikh V. N., Bulatov N. D. Continental effect in geographical distribution of electron concentration of the 2F layer // Report. Academy of Sciences of the USSR. 1944. – V. 45. – No. 6. – Pp. 250 – 253.
3. Shefov N. N., Semenov A. I., Khomich V. Yu. Upper atmosphere emission – indicator of its structural and dynamic characteristics. – Moscow : GEOS, 2006. – 741 p.
4. Kan S. I. Ocean and atmosphere. – Moscow : Nauka (Science), 1982. –144 p.
5. GOST R 25645.-2004. Earth upper atmosphere. Density model for ballistic support of flights of artificial earth satellites. Moscow : Standards Publishing House, 2004. – 28 p.
6. Karabadzhak G. F., Biryukova N. S., Lavrenko E. G., Peklevsky A. V., Repin I. Yu., Rossiyskaya E. I., Chikirev V. N. Program of scientific and applied research and experiments in the Russian segment of the International Space Station // In the collected works 'Ideas of K. E. Tsyolkovsky in science and engineering innovations. Proceedings of the 51st readings in the memory of K. E. Tsyolkovsky, Kaluga. Publisher: Zakharov S.I. ('SerNa'), 2016. – 496 p.

7. Glazkova I. A. Analysis of experience in ERS space systems development on the basis of small satellites and the trends of Russian space industry development in this sphere // Cosmonautics and rocket engineering, 2010. – No. 2 (59). – Pp. 70 – 77.
8. Klyushnikov V. Yu., Pozin A. A., Shershakov V. M., Shuvalov V. A., Yakovlev A. A. Systemic issues of unified rocket complex development for launching small spacecraft for applied scientific research // Cosmonautics and rocket engineering, 2017. – No. 6 (99). – Pp. 23 – 31.

*Aleksandr Vitalyevich Karelin, Doctor of Physics and Mathematics (D. Sc.), Chief Researcher,
tel.: +7 (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru.*

*Yuri Aleksandrovich Kuzmin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Sector,
tel.: +7 (495) 513-40-88, e-mail: kuzminya@tsniimash.ru.*

*Vyacheslav Aleksandrovich Shuvalov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher,
tel.: +7 (495) 513-49-45, e-mail: vashuvalov@tsniimash.ru.*

*Aleksandr Aleksandrovich Yakovlev, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Deputy Head of Department,
tel.: +7 (495) 513-47-44, e-mail: aayakovlev@tsniimash.ru.
(JC «TSNIIMASH»).*