

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 629.7.054:523.7:523.9:551.510:629.78

ЦЕЛЕВАЯ АППАРАТУРА ПЕРСПЕКТИВНОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ

А. В. Карелин, Е. М. Твердохлебова, В. А. Шувалов, А. А. Яковлев

Представлена структура распределенной полномасштабной космической системы мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки, включающей семь автономных группировок космических аппаратов. Приводится количественный состав и баллистическое построение космических аппаратов каждой группировки. Определены вариации параметров геофизических процессов, состав приборных комплексов и требуемые характеристики целевой аппаратуры космических аппаратов каждой группировки.

Ключевые слова: целевая аппаратура, группировка космических аппаратов, гидрометеорологическая и геофизическая обстановка, баллистическое построение.

Введение

Основой любого космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является бортовая целевая аппаратура (ЦА). Именно она определяет функциональное назначение и облик КА. Заметим, что любой КА можно условно разделить на две части: комплекс ЦА и платформу служебных систем, которую за рубежом называют шиной.

Известно, что создание КА начинается с определения решаемых задач, далее формируется приборный состав комплекса ЦА, требования к измерительным характеристикам приборов и баллистическому построению КА. Эти исходные данные являются основанием для разработки служебной платформы, обеспечивающей функционирование ЦА и КА в целом. Здесь наблюдается три подхода к проектированию и созданию спутника. Первый предполагает разработку служебной платформы и ЦА в рамках единого технологического процесса. Вторым нацелен на разработку комплекса ЦА с поиском подходящей платформы из имеющегося задела. Третий подход основан на использовании опережающих заделов спутниковых платформ и ЦА. Проектирование КА будет в основном заключаться в адаптации ЦА к выбранной платформе.

На первых этапах космической деятельности КА создавались в соответствии с первым подходом в интересах преимущественно научных исследований в космосе. При этом ЦА разрабатывалась в научно-исследовательских институтах академии наук, где производственная база была слабой.

Однако, расширение задач космической деятельности требовало увеличения производства космических приборов (что было сложно осуществить силами академических институтов). Тем не менее производство космических платформ возросло, более того они унифицировались под различные виды полезной нагрузки, а разработка ЦА

ориентировалась под определённую платформу из имеющегося технологического задела. Такая практика реализует второй подход в создании КА.

Третий подход основан на создании опережающих заделов как по ЦА, так и космических платформ. Тогда создание спутников заключается в адаптации ЦА на подходящей платформе. Важным условием реализации этого подхода является наличие перспективных космических программ или концепций космической деятельности. За рубежом такой подход активно развивается и мотивируется потребностью в создании серийных, дешёвых, многофункциональных, многоцелевых группировок быстрого развёртывания. В России сегодня существует некоторый задел по платформам, но отсутствует опережающий задел по ЦА. У нас в стране космическое приборостроение единичное, дорогое и в условиях недостатка специализированных производств не обеспечивает текущие потребности и тем более задел. В основном это связано с недостатками планирования и разработкой программ, неопределённостью целей космической деятельности и перспектив космического приборостроения, слабой обеспеченностью ресурсами и оснащённостью технологической базы.

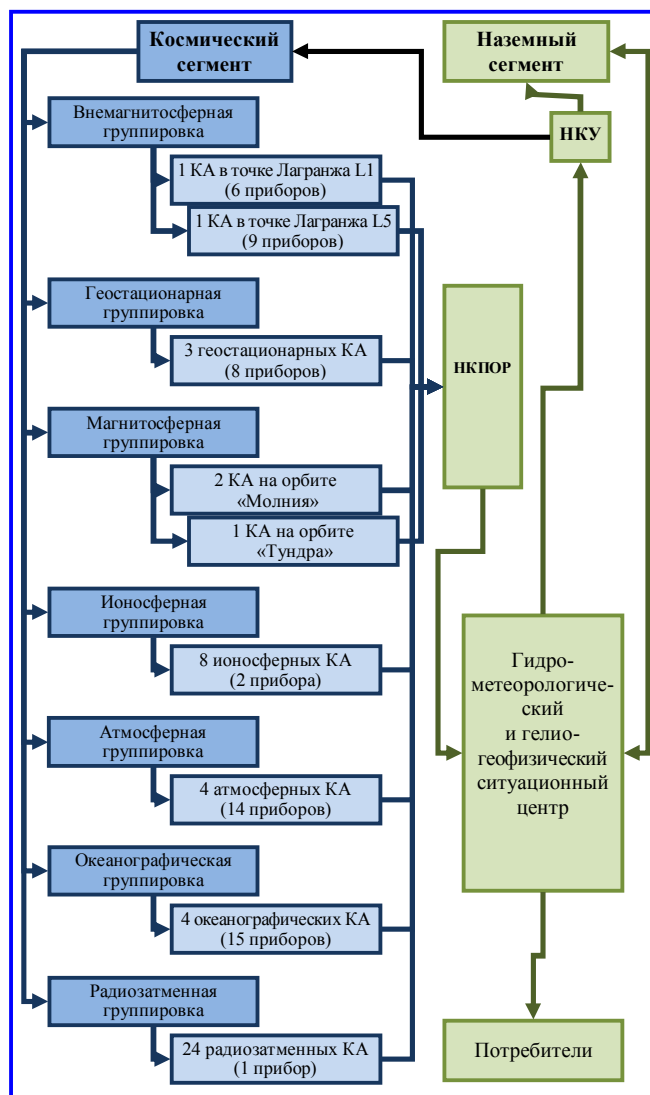
В настоящее время неоспоримой тенденцией космической деятельности является потребность в создании и развёртывании космических систем (КС) мониторинга, т. е. КС практического применения (по отношению к научным КА). При этом возрастают требования к ЦА, количеству и качеству измерительных средств, метрологическому обеспечению, верификации и валидации измерений в космосе. Потребность в создании необходимого количества и качества бортовых приборов наблюдается в таких областях ДЗЗ как гидрометеорология, геофизика, климатология, океанография, экология и др. [1, 2]. Обеспечение этих требований возможно на пути создания специали-

рованных научно-производственных предприятий и развитой компонентной базы. Таким образом, для решения проблем приборостроения, а следовательно и космической деятельности необходимо наличие крупномасштабных целевых проектов (концепций, программ) перспективных систем мониторинга с обоснованием состава приборов, их характеристик, баллистического построения в космосе, что позволит разработать планы создания задела перспективной ЦА. Следовательно, наличие конкретных целей мотивирует космическое приборостроение, поднимет его технологический уровень, обеспечит приборный задел для отечественных КС, сократит сроки и стоимость производства КА.

Целью настоящих исследований является анализ особенностей приборного комплекса космической полномасштабной системы мониторинга, разрабатываемой в [2 – 4]. Здесь под определением «полномасштабной» понимается КС мониторинга, включающая минимальное, но достаточное количество КА, объединенных в единый измерительный инструмент, позволяющий получить необходимое число количественных данных о параметрах геофизических процессов, обеспечивающих формирование информации о состоянии и прогнозировании гидрометеорологической и гелиогеофизической обстановки высокой достоверности и заблаговременности. Приводится концептуальная структура системы мониторинга, баллистическое построение, состав группировок КА, требования к ЦА и характеристикам приборов каждой группировки КА. Предложенный состав приборных комплексов может служить основой для разработки технологической программы создания опережающего задела ЦА перспективных КС мониторинга ДЗЗ.

Структура системы мониторинга и вариации измеряемых параметров геофизических процессов

Разрабатываемая система мониторинга включает 7 группировок КА, а именно: внемагнитосферную, включающую 2 КА, геостационарную – 3 КА, магнитосферную – 3 КА, ионосферную – 8 КА, атмосферную – 4 КА, океанографическую – 4 КА и радиозатменную – 24 КА. Структурная схема полномасштабной системы мониторинга показана на рисунке. Целевая аппаратура пяти группировок имеет одинаковый состав на каждом КА соответствующей группировки, в двух других несколько отличается по составу. Ниже рассматриваются характеристики и целевое назначение всего приборного комплекса перспективной системы мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки.



Структурная схема перспективной системы мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки

Отметим, что параметры гидрометеорологических и геофизических процессов характеризуются высокой чувствительностью к различным воздействиям, тем не менее их вариации имеют ограниченные диапазоны. Проектирование приборов, как правило, начинается с определения диапазона измерений и точности, для этого используем данные [5] и приведем состав измеряемых параметров основных процессов и их вариации:

– концентрация электронов в ионосфере, включая вертикальные профили электронной концентрации, модификации высотного профиля электронной концентрации в ионосфере и характеристики мелкомасштабных неоднородностей в ионосфере; значения максимальной концентрации заряженных частиц N_{max} и высоту максимума n_e в слое F2 ионосферы $h(N_{max})$;

- параметры ионосферной плазмы (скорости дрейфа ионов в диапазоне 0,2 – 5,0 км/с, концентрация ионов в диапазоне 10^2 – 10^6 см³, температура ионов в диапазоне 300 – 10 000 К, возмущения ионного состава, колебания плотности ионов в диапазоне частот 0,5 Гц – 1 кГц;

- КНЧ и ОНЧ излучения, волновая форма электромагнитных колебаний в диапазоне частот 0,1 Гц – 5 кГц, спектральная плотность электромагнитных колебаний в диапазоне частот 1 Гц – 15 кГц (в том числе вистлеры, свисты и др.);

- три взаимноперпендикулярные компоненты вектора магнитной индукции с диапазоном измерения магнитной индукции по каждому каналу от –60 мкТл до +60 мкТл; спектр колебаний электромагнитного поля в диапазоне частот 15 кГц – 15 МГц;

- вариации интенсивности оптических атмосферных эмиссий в линиях 557,7 и 630,0 нм свечения атомарного кислорода и в полосе гидроксидов ОН 728,0 нм, вариации спектрального распределения интенсивности свечения гидроксидов ОН в полосе длин волн 727 – 1103 нм, измеренные в направлении лимба Земли;

- содержание металлизированных аэрозолей в диапазоне 270 – 280 нм и малых газовых составляющих в субмиллиметровом диапазоне 300 – 1000 мкм в приземной атмосфере, их состав и концентрация;

- скорость ветра в стратосфере и мезосфере до 300 м/с;

- потоки уходящего инфракрасного (ИК) излучения (в диапазоне 2 – 15 мкм) на высоте верхней кромки облаков;

- изображения Солнца и солнечной короны на расстояниях до 30 радиусов Солнца в ультрафиолетовом (УФ), рентгеновском и видимом диапазоне излучений;

- мониторингирование солнечных вспышек в диапазоне от 0,5 до 20 Å.

Ниже рассмотрим и приведем характеристику и целевое назначение всего приборного комплекса перспективной системы мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки.

Внемагнитосферная группировка

Группировка состоит из 2 КА, расположенных на гало-орбитах в окрестностях точек либрации L1 и L5 системы «Солнце – Земля». КА в точке L5 предназначен для мониторинга геоэффективных событий на Солнце и оснащается комплексом аппаратуры из 6 приборов:

- солнечный телескоп вакуумного УФ-диапазона для получения изображений солнечной короны в режиме реального времени в спектральных диапазонах 30,4 нм; 17,1 нм; 13,1 нм;

- солнечный коронограф оптического диапазона для измерения характеристик корональных выбросов массы на расстояниях до 10 – 30 радиусов Солнца;

- солнечный магнитограф оптического диапазона для получения простых и синоптических карт магнитного поля на поверхности Солнца;

- монитор солнечного ветра для измерения энергии ионов в диапазонах от 0,1 до 3,7 кэВ;

- магнитометр межпланетного магнитного поля с диапазоном измерения от 0 до 300 нТл при точности – 0,1 нТл;

- детектор солнечных вспышек: число каналов – 20 (канал 1: от 0,5 до 4 Å; канал 2: от 1 до 8 Å; каналы 3 – 20: программным способом).

КА в точке L1 выполняет задачи аналогичные КА в точке L5, а также задачи мониторинга теплового баланса Земли, для чего оснащается дополнительно 3 приборами (всего 9 приборов):

- измеритель солнечной постоянной;

- измеритель альбедо Бонда;

- радиометр в диапазоне 0,1 – 100 мкм.

Геостационарная группировка

Группировка состоит из 3 КА на геостационарной орбите. КА предназначены для получения изображений низкого разрешения облачности, снежного покрова суши, ледового покрова поверхности морей и океанов, контроля солнечной активности и альбедо Земли в интересах определения глобальных трендов изменений климата, потоков заряженных и нейтральных частиц. На каждом КА устанавливается единый приборный комплекс, состоящий из 8 приборов:

- многозональное сканирующее устройство для одновременной съемки не менее чем в 20-ти каналах;

- гиперспектральный ИК-зондировщик;

- детектор молний с регистрацией явлений в реальном масштабе времени;

- гелиогеофизический аппаратный комплекс (спектрометр низкоэнергичных электронов в 10 энергетических интервалах в диапазоне от 0,15 до 10,0 МэВ и протонов; в 10 энергетических интервалах в диапазоне от 2,0 до более 160,0 МэВ; дифференциальных энергетических спектров низкоэнергичных электронов и протонов в энергетическом интервале от 0,05 до 20,0 кэВ; спектрометр галактических космических лучей с энергией более 600 МэВ; измеритель потока рентгеновского излучения Солнца 3 – 10 кэВ в динамическом диапазоне от 10^6 до 10^8 квант·см⁻²·с⁻¹; измеритель УФ-излучения Солнца в линии H α (121,6 нм) в динамическом диапазоне от 1 до 30 эрг·см⁻²·с⁻¹; векторный магнитометр в диапазоне ± 65 мкТл с погрешностью ± 5 нТл).

Магнитосферная группировка

Группировка состоит из 3 КА на высокой эллиптической орбите (ВЭО): 2 КА – на орбите типа «Молния» и 1 КА – на орбите типа «Тундра». КА на орбите типа «Молния» предназначены для получения картографических изображений облачности и подстилающей поверхности Арктики в различных диапазонах спектра и контроля основных параметров полярной ионосферы, верхней атмосферы, магнитосферы, электромагнитных излучений природного и антропогенного характера, а также обзора авроральной области в УФ-, видимом и ИК-диапазонах. На обоих КА на орбите типа «Молния» устанавливается единый приборный комплекс, состоящий из 10 приборов:

- адаптивный ионозонд в диапазоне 0,1 – 30 МГц с изменяемым шагом частоты и переменной выходной мощностью;

- многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического назначения (спектральный диапазон от 0,4 до 14 мкм, 20 каналов);

- гелиогеофизический аппаратный комплекс (спектрометр низкоэнергичных электронов и протонов; спектрометр галактических космических лучей; векторный магнитометр – аналогичные приборам комплекса геостационарной группировки);

- авровизор (кислородная эмиссия на длине волны $\lambda_1 = 630$ нм; эмиссия иона молекулы азота на длине волны $\lambda_2 = 427,8$ нм; водородная эмиссия на длине волны $\lambda_3 = 486,1$ нм);

- аппаратура радиотехнического контроля электромагнитных излучений из 4 приборов (широкополосный анализатор в диапазоне частот от 0,8 Гц до 200 МГц; приемник-анализатор с высокой чувствительностью (ВЧ) – 0,1 – 48 МГц; радиоспектрометр ультракоротких волн (УКВ) излучений – 41 – 53 МГц и 75 – 92 МГц; низкочастотный волновой комплекс – 1 Гц – 20 кГц);

КА на орбите типа «Тундра» предназначен для контроля параметров магнитосферы, включая магнитопаузу, полярной ионосферы, электромагнитных излучений природного и антропогенного характера. Данный КА оснащается гелиогеофизическим аппаратным комплексом и аппаратурой радиотехнического контроля электромагнитных излучений, идентичными устанавливаемым на КА магнитосферной группировки на орбите типа «Молния» – всего 7 приборов.

Ионосферная группировка

Группировка состоит из 8 КА на орбитах высотой 800 км в восьми околополярных орбитальных плоскостях, равномерно разнесенных относительно направления на Солнце. КА предназначены для контроля параметров ионосферы с помощью радио-

локатора. На каждом КА группировки устанавливается ионозонд и зонд Ленгмюра для калибровки:

- ионозонд в диапазоне 1 – 20 МГц с шагом 50 кГц;
- зонд Ленгмюра (концентрация ионов в диапазоне $N_i - 10^2 - 10^7$ см⁻³; температура электронов $T_e - 0,1 - 5,0$ эВ; энергетический спектр тепловых ионов $E \leq 30$ эВ).

Атмосферная группировка

Состоит из 4 КА на солнечно-синхронных орбитах высотой 800 – 900 км. КА предназначены для получения многозональных изображений, включая радиолокационные, в целях мониторинга и прогноза гидрометеорологической обстановки. На каждом КА устанавливается единый приборный комплекс, состоящий из 14 приборов:

- блок гидрометеорологических приборов:

- многозональное сканирующее устройство малого разрешения (пространственное разрешение – 0,5 км; спектральный диапазон – 0,4 – 14 мкм; не менее 20 спектральных зон);

- инфракрасный Фурье-спектрометр (спектральный диапазон – 3,6 - 15,5 мкм; спектральное разрешение – $0,35 \div 0,55$ см⁻¹);

- модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы (диапазон рабочих частот – $6,9 \div 183,31$ ГГц, количество каналов – 8);

- спектрометр для определения газового состава атмосферы (спектральный диапазон – 240 – 2400 нм; информационных каналов – 8; пространственное разрешение – 16 км);

- блок геофизических приборов:

- гелиогеофизический аппаратный комплекс (спектрометр низкоэнергичных электронов и протонов; спектрометр галактических частиц; векторный магнитометр – аналогичные приборам комплекса геостационарной группировки);

- радиочастотный масс-спектрометр (в диапазонах 1 – 4, 10 – 20 и 20 – 50 а.е.м.);

- озонометр (диапазон длин волн 300 – 500 нм, спектральное разрешение 0,4 – 0,6 нм);

- спектрозональная система (измерение пространственного распределения интенсивности излучения линий 630 нм и 427,8 нм с пороговой чувствительностью 50 – 70 Рл);

- аппаратура радиотехнического контроля электромагнитных излучений из 4 приборов (аналогичная аппаратуре на КА магнитосферной группировки).

Океанографическая группировка

Состоит из 4 КА на солнечно-синхронных орбитах высотой 800 – 900 км. КА предназначены для анализа и прогноза состояния акватории морей и океанов. Приборный состав КА океанографической группировки включает 15 приборов:

- блок океанографических приборов:

– скаттерометр Ки-диапазона с режимом вблизи надирного зондирования (частот – 13 250 – 13 740 МГц; пространственное разрешение – ≤ 25 км; полоса обзора – > 1600 км);

– сканер цветности океана (количество спектральных зон – 13; пространственное разрешение – ≤ 1 км; полоса – > 1800 км);

– сканер береговой зоны (количество спектральных зон – 6; пространственное разрешение – ≤ 80 м; полоса – > 1000 км);

– ИК-радиометр малого разрешения (разрешение – ≥ 1 км; полоса захвата – 3000 км; число спектральных диапазонов – 6);

– бортовой радиолокационный комплекс (мониторинг в X-диапазоне; пространственное разрешение не хуже 20 м);

– блок геофизических приборов – аналогичен блоку геофизических приборов на гидрометеорологической группировке КА.

Радиозатменная группировка

Группировка состоит из 24 малых КА на околополярных орбитах высотой до 1000 км. КА предназначены для мониторинга ионосферы и атмосферы методом радиозатменного зондирования на базе сигналов глобальных навигационных спутниковых систем.

Аппаратура радиозатменного мониторинга атмосферы и ионосферы позволяет определять параметры атмосферы (коэффициент преломления, плотность, давление – не хуже 1%, температура – не хуже 1 К) на высотах 0,5 – 50 км; электронную концентрацию ионосферы на высотах 80 – 400 км (не хуже 10^3 эл/см³) и интегральную электронную концентрацию на трассе КА радиозатменной группировки – КА глобальных навигационных спутниковых систем. При этом расстояние между точками измерения вертикальных профилей температуры и давления атмосферы составит – не более 200 м, а расстояние между точками измерения вертикальных профилей электронной концентрации ионосферы – не более 1 км.

Заключение

Рассмотрены состав и структура перспективной полномасштабной космической системы мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки включающей семь группировок КА: внемагнитосферную, геостационарную, магнитосферную, ионосферную, атмосферную, океанографическую, радиозатменную.

Разработан состав целевой аппаратуры и функциональное назначение аппаратных комплексов каждой группировки КА системы мониторинга.

Обоснованы требования к измерительным характеристикам каждого прибора из состава целевой аппаратуры всех группировок КА системы мониторинга.

Литература

1. Чернявский Г. М. Перспективы космического мониторинга Земли / Г. М. Чернявский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 1. – № 1. – 2004. – С. 39 – 46.
2. Особенности конъюнктуры мирового рынка услуг дистанционного зондирования Земли и области их использования / С. А. Бондарев, С. А. Вериги, В. В. Жогличева [и др.] // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – Т. 9. – № 3-1. – 2019. – С. 304 – 314.
3. Концепция построения космической системы мониторинга геофизической обстановки / А. В. Карелин, Е. М. Твердохлебова, В. А. Шувалов [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – № 1 (100). – 2018. – С. 19 – 32.
4. Концепция создания космической системы мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки / А. В. Карелин, Е. М. Твердохлебова, В. А. Шувалов [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – № 4 (109). – 2019. – С. 129 – 140.
5. Наблюдение изменчивости природной среды и концепция перспективной космической системы мониторинга геофизической обстановки / М. П. Шальнов, В. А. Шувалов, А. А. Яковлев // Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды»; под общ. ред. М. М. Пенькова – Санкт-Петербург : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. – В 2-х томах. – Т. 2. – С. 427 – 431.

Поступила в редакцию 07.02.2020

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

Екатерина Михайловна Твердохлебова, кандидат технических наук, заместитель начальника Центра, т. (495) 513-42-24, e-mail: tverdohlebovaem@tsniimash.ru.

Вячеслав Александрович Шувалов, кандидат технических наук, ведущий 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. (ФГУП ЦНИИмаш).

SPECIAL EQUIPMENT OF THE RUSSIAN FUTURE HYDROMETEOROLOGICAL AND GEOPHYSICAL SPACECRAFT CONSTELLATION

A. V. Karelin, E. M. Tverdohlebova,
V. A. Shuvalov, A. A. Yakovlev

The paper describes a structure of the distributed fully specified space system for hydrometeorological and geophysical monitoring. The system includes seven independent spacecraft constellations. Ballistic formations and numbers of each spacecraft constellation are provided. Values fluctuations of the geophysical processes, instrument sets and performance to be matched for specified equipment of spacecraft of each constellation are settled.

Key words: special equipment, spacecraft constellation, hydrometeorological and geophysical environment, ballistic formation.

References

1. Future expectations of the Earth space monitoring / G. M. Chernyavskiy // Actual issues of the Earth remote sensing. – Vol. 1. – № 1. – 2004. – P. 39 – 46.
2. Bondarev S. A., Verigo S. A., Zhoglicheva V. V., Kudryashov A. B. Market characteristics of the Earth remote sensing services and their scope / S. A. Bondarev, S. A. Verigo, V. V. Zhoglicheva [et al] // Economy: yesterday, today and tomorrow. – Vol. 9. – № 3-1. – 2019. – P. 304 – 314.
3. Concept of space system for geophysical monitoring / A. V. Karelin, E. M. Tverdohlebova, V. A. Shuvalov [et al] // Cosmonautics and rocket science. – № 1 (100). – 2018. – P. 19 – 32.
4. Karelin A. V., Tverdohlebova E. M., Shuvalov V. A., Yakovlev A. A. Concept of space system for hydrometeorological and geophysical monitoring / A. V. Karelin, E. M. Tverdohlebova, V. A. Shuvalov [et al] // Cosmonautics and rocket science. – № 4 (109). – 2019. – P. 129 – 140.
5. Monitoring of natural environment variations and concept of future space system for geophysical monitoring / M. P. Shalnov, V. A. Shuvalov, A. A. Yakovlev // Papers of the III All-Russian scientific conference Issues of military applied geophysics and monitoring of the state of environment; general editorship by Penkov M. M. – St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy, 2014. – In two volumes. – Vol. 2. – P. 427 – 431.

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

*Ekaterina Mikhailovna Tverdohlebova, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Engineering science,
Deputy Head of the Center, tel. +7(495) 513-42-24, e-mail: tverdohlebovaem@tsniimash.ru.*

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

*Aleksandr Aleksandrovich Yakovlev, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Engineering science,
Deputy Head of the Department, tel. +7(495) 513-47-44, e-mail: aayakovlev@tsniimash.ru.
(FSUE TSNIImash).*