



DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-3-247-260
УДК 629.78

Научная статья / Research article

Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Часть 3. Результаты применения

А.В. Старков ^a✉, А.А. Емельянов ^b, Л.А. Гришанцева ^c,
К.И. Жуковская ^c, А.А. Морозов ^c, А.А. Тришин ^a

^aМосковский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

^bНаучно-исследовательский институт точных приборов, Москва, Россия

^cНаучный центр оперативного мониторинга Земли, Москва, Россия

✉ starkov@goldstar.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 13 июля 2021 г.

Доработана: 22 сентября 2021 г.

Принята к публикации: 13 октября 2021 г.

Ключевые слова:

дистанционное зондирование Земли, обработка данных, информационные потоки, результаты отработки, показатели эффективности, пункты приема информации, наземный комплекс приема, алгоритмы обработки информации, алгоритмы распределения информации







Аннотация. Исследование посвящено вопросам практической реализации представленной методологии управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Описаны архитектура и порядок применения программно-математических моделей комплекса, которые реализуют предложенную ранее модель организации потоков целевой информации и обеспечивают возможность определения состава и характеристик системы, включающей в себя космические аппараты, наземные приемные комплексы и каналы связи между ними, формирование сценариев работы с данными дистанционного зондирования Земли, формирование входных потоков информации, проведение расчетов по распределению целевой информации с разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли по составным частям космической системы дистанционного зондирования Земли, визуализацию результатов расчетов и сохранение полученных результатов. Это позволяет оптимизировать распределение процессов обработки информации по заявкам потребителей, используя как скалярный, так и векторный критерии, автоматизировать формирование плана распределения обработки заявок потребителей по узлам системы, проводить оценку текущего состояния инфраструктуры с точки зрения возможностей обработки заявок потребителей и выявлять возможные проблемы в будущем.

Для цитирования

Старков А.В., Емельянов А.А., Гришанцева Л.А., Жуковская К.И., Морозов А.А., Тришин А.А. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Часть 3. Результаты применения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 3. С. 247–260. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-3-247-260>



Methodology for managing the flows of target information in the remote sensing space system. Part 3. Application results

Alexander V. Starkova ^a  , Andrey A. Emelianov ^b, Lyubov A. Grishantseva ^c ,
Ksenia I. Zhukovskaya ^c , Alexander A. Morozov ^c , Alexey A. Trishin ^a 

^aMoscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

^bResearch Institute of Precision Instruments, Moscow, Russia

^cResearch Center for Earth Operative Monitoring, Moscow, Russia

✉ starkov@goldstar.ru

Article history

Received: July 13, 2021

Revised: September 22, 2021

Accepted: October 13, 2021

Keywords:

remote sensing of the Earth, data processing, distribution of information resources, application results, efficiency, information reception points, ground-based information reception and distribution complex

Abstract. The article focuses on the practical implementation of the proposed methodology for managing target information flows in the Earth remote sensing (ERS) space system. Proposed is the description of architecture and order of application of software-mathematical models of the complex, which implements the previously presented model of the arrangement of target information flows and provides the possibility of determining composition and characteristics of the system, that includes satellite, ground receiving complexes and communication channels there between, generation of scenarios of operation with ERS data, generation of input information flows, calculation of the distribution of target information from various types of ERS satellite by components of the ERS space system, visualization of calculation results and preservation of the obtained results. This makes it possible to optimize the distribution of information processing processes according to customer requests, using both scalar and vector criteria, automate the formation of a plan for the distribution of customer requests processing among system nodes, assess the current state of infrastructure in terms of the capabilities of processing customer requests and identify possible problems in the future.

For citation

Starkova AV, Emelianov AA, Grishantseva LA, Zhukovskaya KI, Morozov AA, Trishin AA. Methodology for managing the flows of target information in the remote sensing space system. Part 3. Application results. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(3):247–260. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-3-247-260>

Введение

В предыдущих статьях данной серии [1; 2] представлены результаты формализации актуальной задачи управления потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), сформулирована техническая постановка задачи и предложен общий методический подход к решению поставленной технической задачи управления, который включает в себя: формулировку постановки оптимизационной задачи, выбор общего подхода к ее решению и определение условий применимости [3]. Сформирован перечень взаимосвязанных математических моделей, требующих дальнейшей разработки. В совокупности эти модели описывают процесс обработки (рис. 1), в том числе определяют, что происходит с объемом информации и вычисляют системные пока-

затели эффективности – время, требуемое для реализации процесса и его условную стоимость.

Это позволило окончательно представить модель обработки информации как взаимосвязанную последовательность функций изменения условного объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функция изменения трафика), а сама математическая постановка задачи была сведена к оптимизации маршрута прохождения заявки по графу.

Практическая реализация методологии предполагает построение программно-моделирующего комплекса (ПМК) для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, на основе которого можно решать следующие задачи:

– оптимизировать распределение процессов обработки информации по заявкам потребителей,

используя как скалярный (стоимость или время), так и векторный критерий (стоимость + время);
 – автоматизировать формирование плана распределения обработки заявок потребителей по узлам (технологическую карту);

– проводить оценку текущего состояние инфраструктуры с точки зрения возможностей обработки заявок потребителей и выявлять возможные проблемы в будущем.

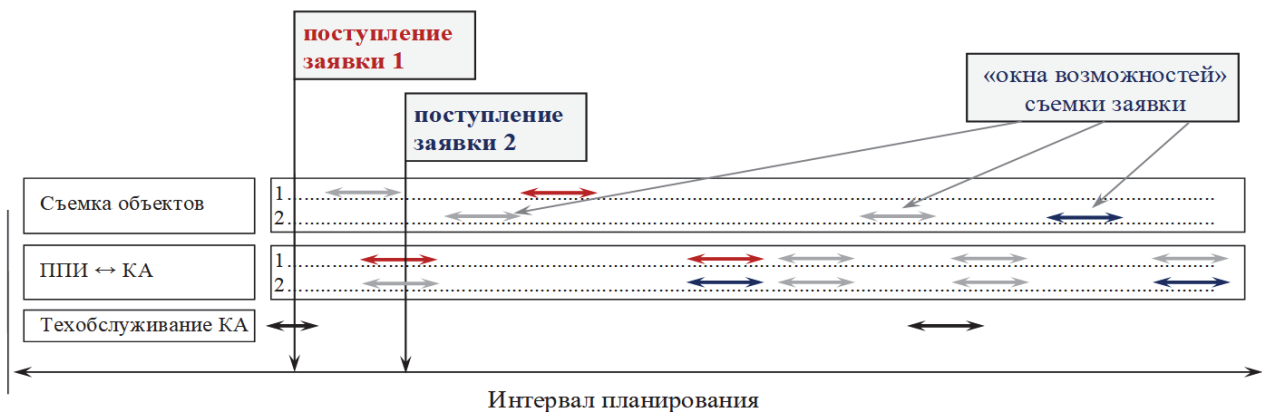


Рис. 1. Последовательность обработки заявок по мере их поступления:
 ППИ – пункт приема информации; КА – космический аппарат

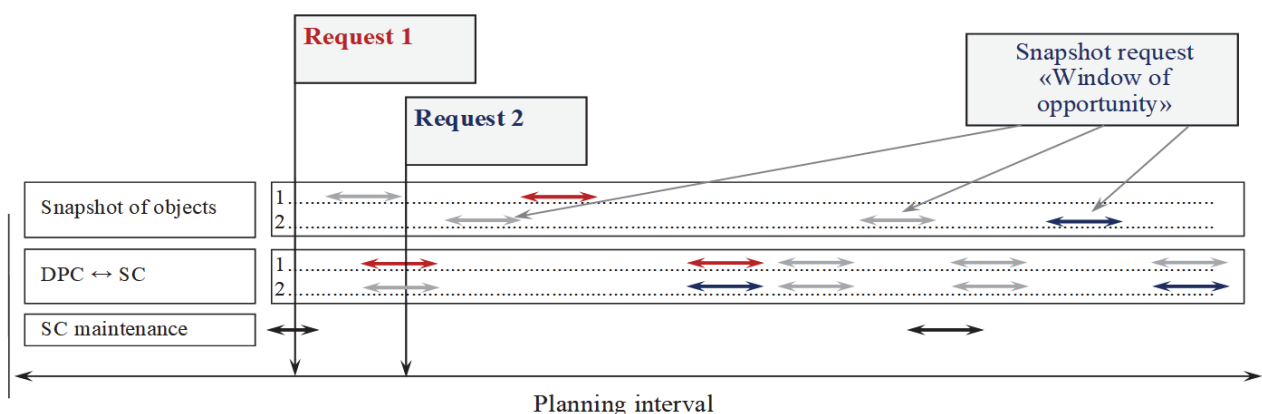


Figure 1. The sequence of processing applications as they are received:
 DPC – Data Processing Center; SC – spacecraft

1. Программно-моделирующий комплекс

Сложность процессов, происходящих при обработке данных ДЗЗ, приводит к тому, что их исследование на основе аналитических моделей для широкого диапазона исходных данных возможно лишь при введении допущений, снижающих адекватность получаемых результатов. Одним из способов, позволяющих оценить качество заложенных алгоритмов оптимизации и информационного обмена, а также получить ряд частных статистических данных, необходимых для разработки адекватных аналитических моделей, является использование математического моде-

лирования на базе предлагаемого авторами специализированного программно-моделирующего комплекса. Основным назначением ПМК является: формализация процессов обработки и передачи данных; организация выполнения и взаимодействия процессов, их взаимодействия с программным обеспечением информационно-вычислительной системы в модельном и реальном времени; управление процессом решения задачи, как в диалоговом, так и в пакетном режиме работы с использованием сценариев обработки; оперативное отображение результатов в графическом и табличном виде; регистрация и обработка результатов.

ПМК должен отвечать требованиям экономичности, надежности, удобства использования, открытости архитектуры, сопровождаемости и адекватности.

Под экономичностью здесь понимаются ограничения на затраты времени для получения результатов и объем оперативной памяти.

Выполнение требования по удобству использования должно обеспечиваться за счет разработки удобной диалоговой программы, облегчающей использование тех или иных возможностей ПМК (доступ к исходным данным, проведение расчетов, построение графиков, внесение изменений в программный код).

Выполнению требования к надежности ПМК способствует структурирование программы путем создания объектов, характерной чертой которых является инкапсуляция (объединение) данных и алгоритмов их обработки. Инкапсуляция позволяет в максимальной степени изолировать объект от внешнего окружения. Она существенно повышает надежность разрабатываемой программы, так как локализованные в объекте алгоритмы обмениваются с программой сравнительно небольшими объемами данных, причем ко-

личество и тип этих данных нетрудно тщательно контролировать.

Требование по сопровождаемости подразумевает обеспечение структурированности программы, что обеспечивается применением аппарата объектно-ориентированного программирования, а также наличие необходимой эксплуатационной документации.

Любая модель должна быть адекватна решаемой задаче, то есть достоверно отображать существенные для данной задачи свойства системы. При этом совокупность компонентов системы и ее внешней среды, характеристики которых существенно влияют на решение задачи, называются объектом моделирования. В объект моделирования входят те компоненты системы и среды, структуры и параметры которых признаны определяющими [1–3]. При этом объект моделирования целесообразно разбить на две составляющие: объект синтеза и внешнюю среду.

Для создания программно-моделирующего комплекса оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ объект моделирования можно принять в виде, представленном на рис. 2.

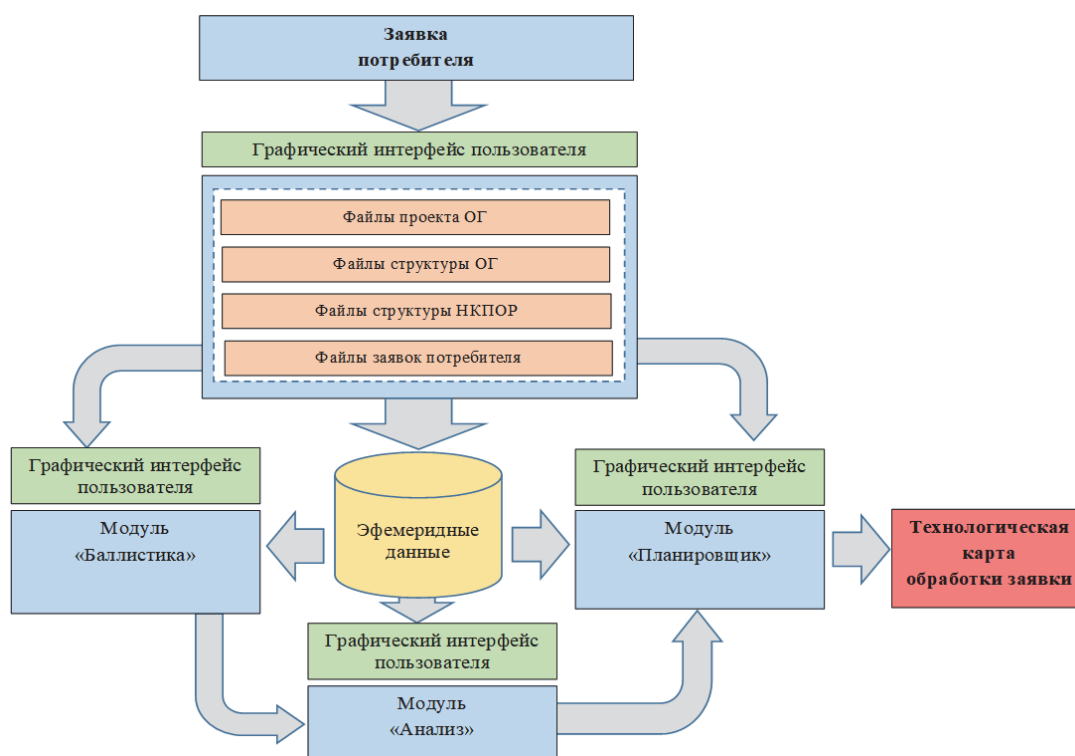


Рис. 2. Архитектура программно-моделирующего комплекса:

ОГ – орбитальная группировка; НКПОР – наземный комплекс приема, обработки и распространения информации

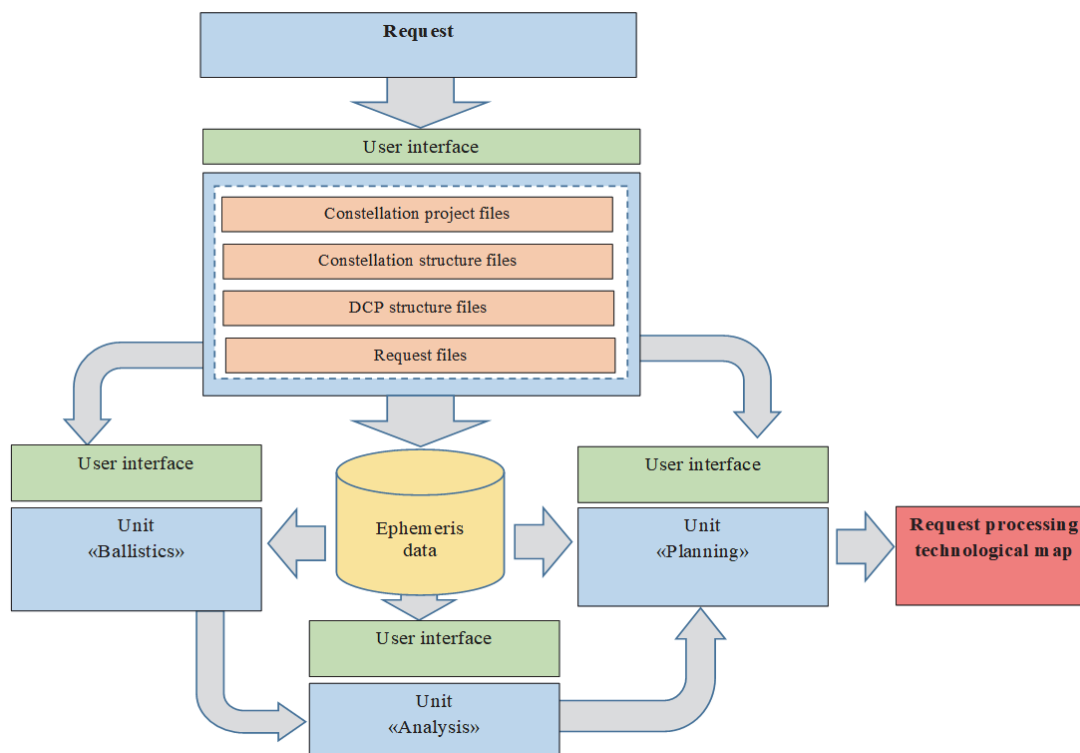


Figure 2. Software architecture

Комплекс построен по принципу модульности и состоит из трех модулей, имеющих условные названия «Баллистика», «Анализ» и «Планировщик».

Модуль «Баллистика» обеспечивает прогнозирование движения спутников орбитальной группировки с учетом принятой стратегии управления под действием различных возмущающих факторов на интервале планирования [4–20]. Он служит источником исходных данных для модуля «Анализ». Эфемеридная информация, сформированная однократно в модуле расчета возмущенного движения космического аппарата (КА), может быть использована для оценки показателей доступности и точности функционирования группировки, а также стратегии коррекции.

Модуль «Анализ» определяет возможные интервалы времени проведения съемки и сброса информации [4–6]. Он использует результаты прогнозирования возмущенного движения КА орбитальной группировки (ОГ) модулем «Баллистика». При работе с модулем «Анализ» пользователь выбирает файл структуры группировки (эфемеридные данные загружаются автоматически), редактирует параметры вычислений и получает результаты.

Модуль «Планировщик» на основании принятой заявки потребителя решает задачу оптими-

зации распределения процессов обработки информации по элементам наземной инфраструктуры [1–3]. Результатом применения модуля является технологическая карта прохождения заявки по узлам системы, в которой содержится информация по каждому этапу ее обработки (процессу обработки), включающая в себя:

- время поступления процесса в узел для обработки;
- время начала выполнения процесса;
- время окончания выполнения процесса;
- время окончания (с учетом ожидания) передачи данных на последующий узел обработки;
- объем входной информации;
- объем выходной информации;
- время выполнения;
- стоимость (обработка + передача).

2. Результаты применения

Обеспечение максимальной эффективности использования возможностей орбитальных группировок КА является основной функцией наземной космической инфраструктуры, что достигается рационализацией номенклатуры технического оборудования на наземных приемных комплексах, оптимизацией размещения пунктов приема и обработки данных на территории РФ и за ее пределами, применением

устойчивых средств связи между элементами наземной космической инфраструктуры (НКИ) (как наземных, так и через спутники-ретрансляторы).

Разработанный программно-моделирующий комплекс оптимизации распределения потоков целевой информации между узлами наземной космической инфраструктуры позволяет смоделировать нагрузку на НКИ в зависимости от состава ОГ и получить производительность всей системы, причем все характеристики системы можно задавать непосредственно пользователю с помощью модуля «Планировщик».

Настройка пользовательских параметров системы. Рассмотрим пользовательскую настройку параметров процессов системы.

Вследствие условности параметра стоимости обработки единицы информации (в данном случае заявки, или маршрута) разработаны формулы расчета зависимости стоимости процессов от средней заработной платы и длительности смены на элементах космической наземной инфраструктуры. Для удобства все полученные результаты нормировались на единицу.

$$C_{\text{чел/час}} = \frac{Z_{\text{сред}}}{DH(O+N+1)(P+1)},$$

$$C_{\text{прием}} = C_{\text{чел/час}}T,$$

$$C_{\text{обр}} = \frac{C_{\text{чел/час}}K}{V_{\text{инф}}},$$

где $C_{\text{чел/час}}$ – условная стоимость одного часа работы оператора; $Z_{\text{сред}}$ – средняя заработная плата в регионе¹; D – среднее количество рабочих дней; H – длительность рабочего дня; O – процент отчислений; N – процент накладных; P – процент прибыли; $C_{\text{прием}}$ – стоимость приема данных; T – длительность смены; $C_{\text{обр}}$ – стоимость обработки данных; K – количество людей в смене; $V_{\text{инф}}$ – объем информации.

Стоимость передачи данных между элементами НКИ вычислялась как отношение месячной аренды канала связи и максимально возможного объема передаваемой информации.

Время выполнения каждого из процессов, а также изменение объема информации в ходе его выполнения регламентированы – длительность про-

цесса приема определяется продолжительностью нахождения космического аппарата в зоне радиовидимости приемного пункта, объем информации в ходе выполнения (сброса) не меняется, для всех остальных процессов параметры определяются соответствующими алгоритмами обработки и эксплуатационной документацией (к примеру, процесс первичной обработки по регламенту занимает около 10 минут для каждого маршрута при увеличении объема информации в 4 раза).

На рис. 3 (модуль «Планировщик») проиллюстрирован процесс приема на наземные приемные комплексы за одни сутки для перспективной ОГ:

– 2 КА типа «Ресурс-ПМ»²;

– 1 КА типа «Обзор-Р»³;

– 2 КА типа «Кондор-ФКА»⁴;

– 2 КА типа «Ресурс-П»⁵;

– 4 КА типа «Канопус-В», в том числе и КА типа «Канопус-В-ИК»⁶;

– 2 КА типа «Канопус-ВО»⁷;

– 5 КА типа «Метеор-М»⁸.

График в верхней части рис. 3 (количество выполняемых процессов) иллюстрирует загруженность всех элементов НКИ, что видно из количества маршрутов в сбросе на данный момент времени на пункт приема, а объем принятой информации в Гбайт (в нижней части графика) демонстрирует, что пункт приема г. Москвы прини-

² Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок. Сведения закупки (Шифр ОКР: «Ресурс-ПМ»). URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ep44/view/documents.html?regNumber=0995000000216000215> (дата обращения: 18.08.2021).

³ Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок. Сведения закупки (Шифр ОКР: «Обзор-Р»). URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ok44/view/documents.html?regNumber=0173100007014000219> (дата обращения: 18.08.2021).

⁴ Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок. Сведения закупки (Шифр ОКР: «Кондор-ФКА»). URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ok44/view/documents.html?regNumber=0173100007014000217> (дата обращения: 18.08.2021).

⁵ Ресурс-П. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D1%81%D1%83%D1%80%D1%81-%D0%9F> (дата обращения: 18.08.2021).

⁶ Канопус-В. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%BF%D1%83%D1%81-%D0%92> (дата обращения: 18.08.2021).

⁷ Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок. Сведения закупки (Шифр СЧ ОКР: «Канопус-В»-О). URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ok504/view/documents.html?regNumber=0995000000220000025> (дата обращения: 18.08.2021).

⁸ Космический комплекс «Метеор-3М». URL: http://www.vniim.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=609:-1-3r-new&catid=37:spaceprograms&Itemid=62 (дата обращения: 18.08.2021).

¹ Средняя зарплата в России по регионам в 2020–2021 годах. URL: <https://visasam.ru/russia/rabotavrf/zarplaty-v-rossii.html> (дата обращения: 18.08.2021).

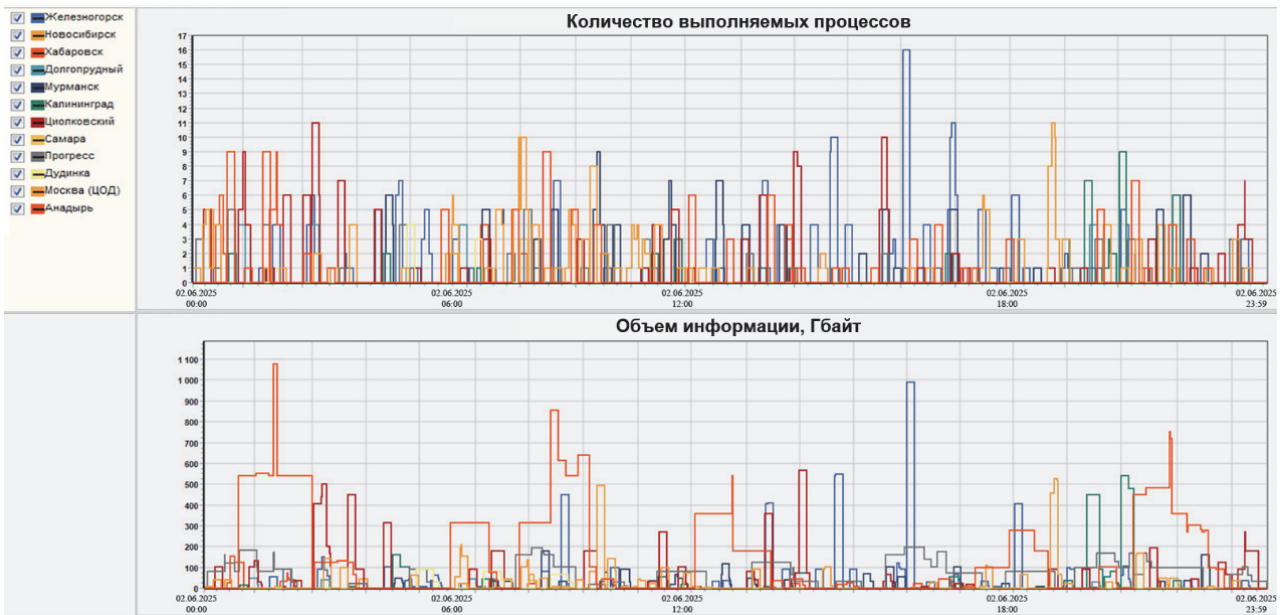


Рис. 3. Процесс приема на всех элементах НКИ за одни сутки

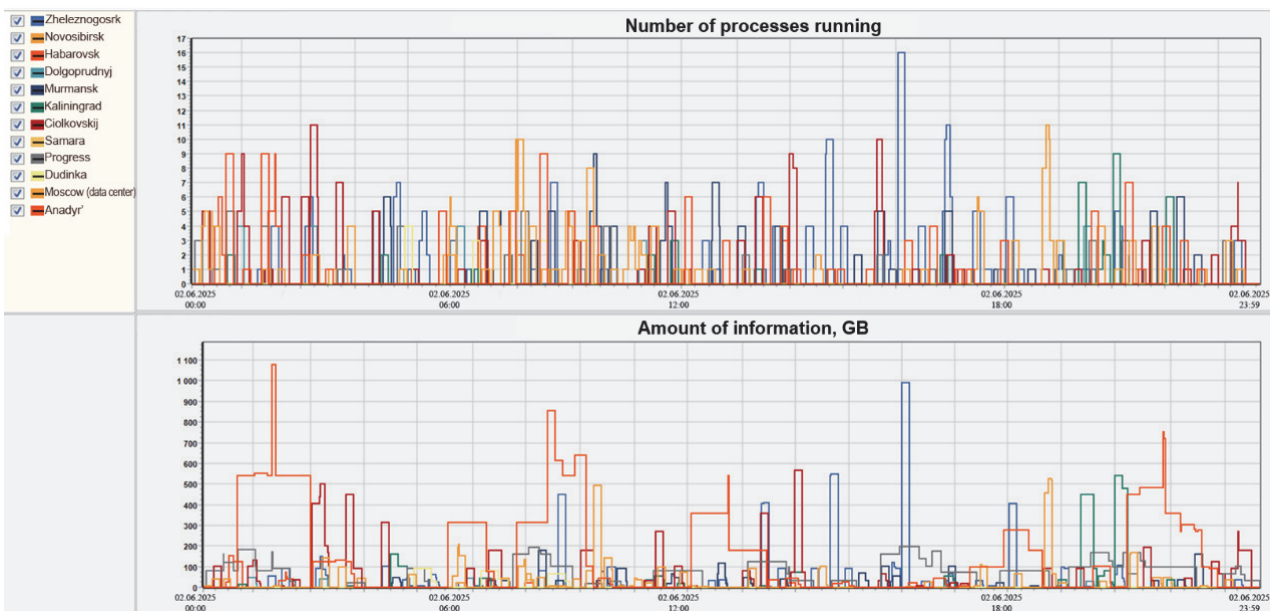


Figure 3. The admission process for all ground-based complexes for receiving and processing Earth remote sensing (ERS) data in one day

мает большой объем данных, что объясняется наличием большого числа приемных комплексов по сравнению с другими пунктами. Ограничения на количество выполняемых процессов, перерывы в работе и суммарный объем хранилищ (входная + выходная информация) задаются пользователем. По умолчанию ограничения в системе отсутствуют. Таким образом, пользователь может полностью смоделировать информационные процессы в наземной космической инфраструктуре.

Сценарии работы. На основе принятого порядка работы с приходящей с ОГ КА ДЗЗ информации отработка проводилась по двум направлениям (сценариям) – каталогизация и стандартная обработка.

В качестве НКИ взята ЕТРИС ДЗЗ [21], состоящая из 13 наземных приемных комплексов.

Сценарий каталогизации включает в себя процесс приема информации, первичную обработку (проверка маршрута на пригодность к дальнейшей

работе), каталогизацию и архивацию (внесение информации о маршруте в специализированную базу данных) и передачу маршрута между элементами НКИ. Сценарий стандартной обработки, в свою очередь, подразделяется на процессы выгрузки маршрута из архива, передачи маршрута между элементами НКИ, непосредственно самой стандартной обработки, а также выдачи обработанного маршрута потребителю. Процессы, входящие в каждый из сценариев, не закреплены по пунктам обработки (за исключением процесса приема), но известно, где они могут выполняться.

В качестве входных данных для первого сценария используются циклограммы работ по сбросам результатов съемки, состоящие из параметров сброса (дата сброса, время начала и время окончания сброса, виток, номер включения на витке, код пункта приема и код КА) и параметров маршрута (дата съемки, ее длительность, виток и номер включения на витке, объем маршрута). В одном сбросе может находиться несколько маршрутов, как правило, их число редко превышает 10 (рис. 3).

Для второго сценария используются циклограммы работ по заявкам потребителей на обработку информации, состоящие из даты и времени заявки, целевой аппаратуры, уровня обработки (от этого зависит время стандартной обработки, а также увеличение объема маршрута в ходе выполнения), кода космического аппарата и кода наземного комплекса, на котором должна обрабатываться заявка.

Каналы связи между элементами НКИ:

- наземный комплекс, расположенный в г. Анадыре, соединен с помощью МКСР «Луч» с комплексами г. Циолковского, а г. Дудинки и ст. Прогресс в Антарктиде соединены по спутниковой связи с наземным комплексом г. Железногорска;

- наземные комплексы г. Железногорска, г. Циолковского, Калининграда, г. Мурманска соединены с центром обработки данных (ЦОД) г. Москвы, ЦОД г. Москвы – с ЦОД в Европейской части РФ⁹.

Моделирование оптимизации наземной космической инфраструктуры. На настоящий момент ежедневно на наземную космическую инфраструктуру поступает около 1 Тбайт инфор-

мации с ОГ КА ДЗЗ. В перспективе ожидается рост числа российских КА ДЗЗ, что приведет к существенному увеличению информационных потоков борт – земля. Соответственно, при таких объемах информации любое несовершенство системы рискует стать критическим, поэтому именно сегодня необходимо найти оптимальную конфигурацию технического состава НКИ и подтвердить возможность работы действующих наземных комплексов с перспективной ОГ.

Оптимизация наземной космической инфраструктуры моделировалась для двух вариантов:

- 1) обработка проводится на средствах, расположенных в ряде региональных центров (РЦ), из состава НКИ, и двух центрах обработки данных в Европейской части РФ, один из которых – ЦОД в г. Москве, второй ЦОД соединен каналом связи высокой пропускной способности с первым. Результаты моделирования позволят сделать вывод о целесообразности централизации обработки маршрутов в ЦОД или распределению по РЦ;

- 2) часть маршрутов принудительно обрабатывается на средствах РЦ, часть – в двух ЦОД в Европейской части РФ. В случае каталогизации маршруты обрабатываются там, где были приняты – для минимизации передачи информации между комплексами, за исключением ряда РЦ, где таких средств нет (г. Анадырь, г. Дудинка и ст. Прогресс в Антарктиде). В случае стандартной обработки заявки распределяются по элементам НКИ в соотношении на основе текущего распределения заявок 1:0.9:0.7:0.7:0.3 между г. Москвой, г. Железногорском, г. Мурманском, г. Циолковским и Калининградом соответственно.

В табл. 1 указаны параметры процессов, используемых в моделировании¹⁰.

Результаты моделирования. Для первого варианта обработки (каталогизации) практически все маршруты, принятые в РЦ, ушли на обработку в ЦОД г. Москвы (рис. 4). В ЦОД, расположенный в Европейской части, маршруты не попали, что объясняется отсутствием каналов связи между ним и региональными элементами НКИ, а также достаточной технической мощностью ЦОД г. Москвы. Полученные результаты иллюстрируют невысокую целесообразность проведения обработки в региональных центрах вследствие существенных различий технического уровня аппаратных средств, участвующих в обработке.

⁹ Единая территориально-распределенной информационная система дистанционного зондирования Земли (ЕТРИС ДЗЗ). URL: http://www.ntsomz.ru/ks_dzz/nkpoi/etris_20200317 (дата обращения: 18.08.2021); «Роскосмос» завершает создание ЕТРИС ДЗЗ. URL: <https://www.comnews.ru/content/119053/2019-04-12/roskosmos-zavershaet-sozdanie-etris-dzz> (дата обращения: 18.08.2021).

¹⁰ РКС переходит на автоматическую обработку данных дистанционного зондирования Земли. URL: <http://russianspacesystems.ru/2020/03/05/rks-perekhodit-na-avtomaticheskuyu/> (дата обращения: 18.08.2021).

Таблица 1

Параметры процессов, используемых в моделировании

Название процесса	Изменение объема	Длительность, мин	Ограничения
Прием	Нет	10	Объем хранилищ в ряде РЦ
Первичная обработка	Рост в 3 раза	30 в РЦ и 10 в ЦОД	Количество одновременно обрабатываемых маршрутов в ЦОД без ограничений, в РЦ ≤ 10
Каталогизация	Нет	25	Количество одновременно выполняемых маршрутов ≤ 10
Стандартная обработка	Рост в 0,8 раз	30 в РЦ и 10 в ЦОД	Количество одновременно выполняемых маршрутов ≤ 5 в РЦ, в ЦОД без ограничений
Выгрузка из архива	Нет	2	Выгрузка только из ЦОД, ограничения зависят от варианта обработки (≤ 5)
Архивация	Нет	2	Нет
Получение обработанных данных	Нет	8	Нет
Передача данных между НКПОР	Нет	0	Нет

Примечание. Время выполнения ряда процессов в региональных центрах в 3 раза больше, чем в ЦОД из-за существенных различий технического уровня аппаратных средств, предназначенных для обработки.

Table 1

Parameters of the processes used in the simulation

Process name	Size change	Duration, minute	Restrictions
Receiving	No	10	Storage capacity in a number of regional centers (RC)
Primary processing	Growth by 3 times	30 in RC and 10 in the data center	The number of simultaneously processed routes in the data center without restrictions, in regional ground-based complexes for receiving and processing ERS data ≤ 10
Cataloging	No	25	The number of routes running simultaneously ≤ 10
Standard processing	Growth by 0.8 times	30 in RC and 10 in the data center	The number of routes running simultaneously ≤ 5 in regional ground-based complexes for receiving and processing ERS data, in the data center without restrictions
Downloading from the archive	No	2	Uploading only from the data center, the restrictions depend on the processing option (≤ 5)
Archiving	No	2	No
Getting the processed data	No	8	No
Data transfer between ground-based complexes for receiving and processing ERS data	No	0	No

Note. The execution time of a number of processes in regional centers is 3 times longer than in a data center due to considerable differences in the technical level of equipment intended for processing.



Рис. 4. Процесс первичной обработки на всех элементах НКИ для первого варианта

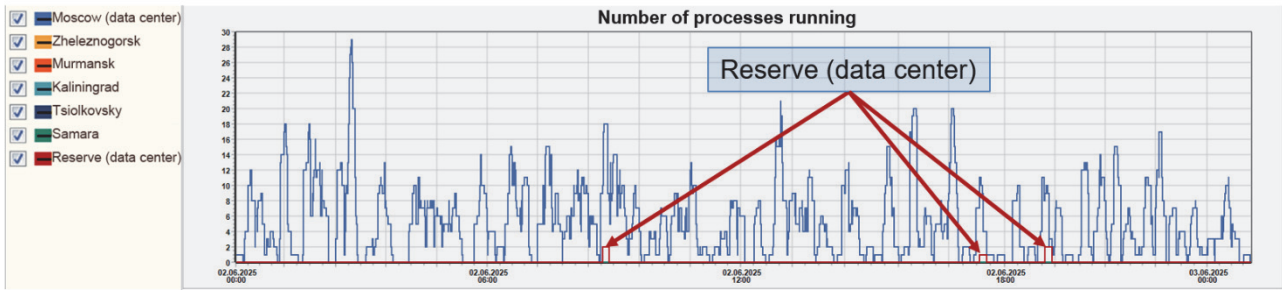


Figure 4. The process of primary processing on all ground-based complexes for receiving and processing ERS data for the first version

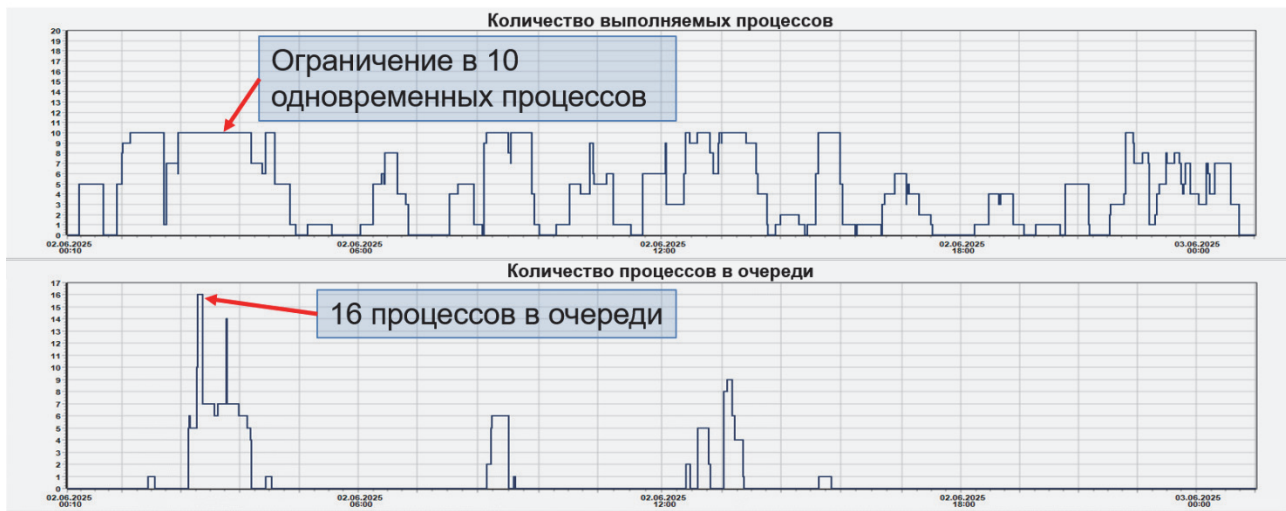


Рис. 5. Процесс первичной обработки на НКПОР г. Циолковский для второго варианта

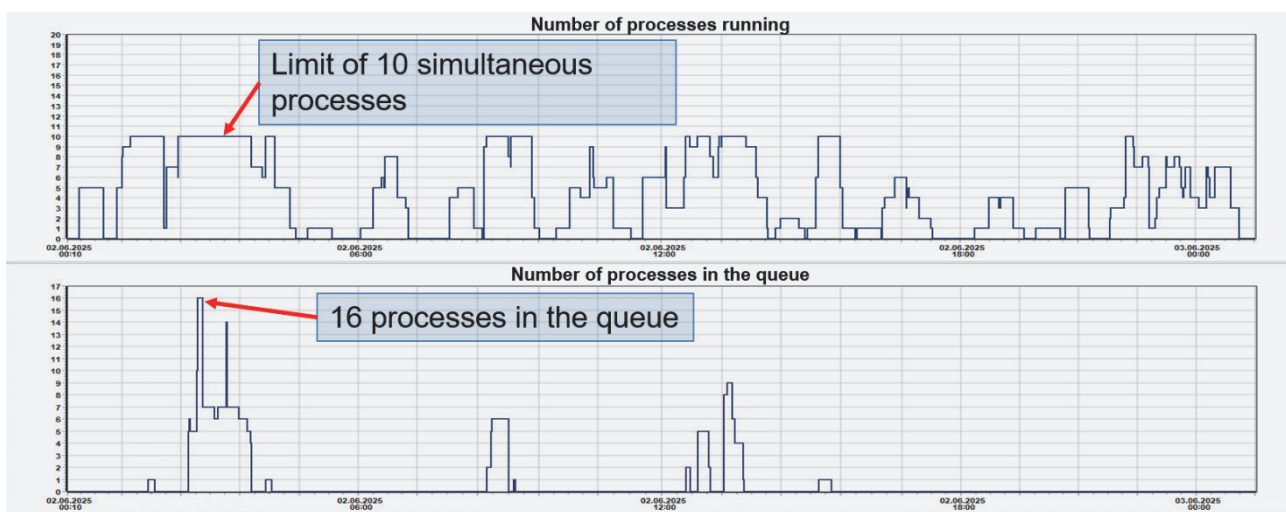


Figure 5. The process of primary processing at ground-based complex for receiving and processing ERS data in Tsiolkovsky city for the second version

Таблица 2

**Сравнение средних величин стоимости и времени обработки
для различных вариантов сценария обработки в региональных центрах и ЦОД**

Варианты сценария	Среднее время обработки маршрута, сут	Средняя стоимость обработки маршрута, у.е.
<i>Каталогизация</i>		
Обработка в двух ЦОД и региональных центрах	0,04	377,574
Обработка в двух ЦОД и региональных центрах с принудительной обработкой в региональных центрах	0,053	418,125
<i>Стандартная обработка</i>		
Без ограничения на выгрузку из архива, обработка в двух ЦОД и в региональных центрах	0,015	14,219
С ограничениями на выгрузку из архива, обработка в двух ЦОД и в региональных центрах	0,028	30,233
Без ограничения на выгрузку из архива, принудительная обработка в региональных центрах	0,206	14,684

Table 2

**Comparison of average values of cost and processing time
for different versions of the processing script in regional centers and data centers**

Script versions	Average route processing time, day	Average route processing cost, standard units
<i>Cataloging</i>		
Processing in two data centers and regional centers	0.04	377.574
Processing in two data centers and regional centers with involuntary processing in regional centers	0.053	418.125
<i>Standard processing</i>		
Without restrictions on downloading from the archive, processing in two data centers and regional centers	0.015	14.219
With restrictions on downloading from the archive, processing in two data centers and regional centers	0.028	30.233
Without restrictions on downloading from the archive, involuntary processing in regional centers	0.206	14.684

В целях подтверждения вывода о целесообразности централизации обработки часть маршрутов принудительно отправлены на обработку в региональные центры (см. второй вариант моделирования). Для этого варианта каталогизации (так называемой принудительной обработки) отмечается возникновение очередей на выполнение процессов на всех элементах НКИ, опять же вследствие наличия ограничений, пример наличия ограничений на процессы обработки (и очередей) продемонстрирован на рис. 5.

Результаты расчета сценария стандартной обработки очень схожи с результатами, полученными при моделировании сценария каталогизации: оба варианта демонстрируют, что из-за ограниченной технической мощности образуются очереди на обработку (в пиковые моменты они составляли более 200 маршрутов), несмотря на то

что только ~20 % данных обрабатывались в региональных центрах, а остальные остались в ЦОД. Кроме того, отсутствие прямых каналов связи второго ЦОД в Европейской части РФ с региональными центрами приводит к тому, что во втором ЦОД, несмотря на его идентичные характеристики с ЦОД г. Москвы, идет на обработку только малая часть маршрутов. В табл. 2 приведено сравнение средних величин условной стоимости и времени обработки для различных вариантов сценария обработки в региональных центрах и ЦОД.

Разница в величинах среднего времени каталогизации для двух вариантов сценария составляет около 18 минут (0,013 суток), однако для больших информационных потоков это может стать критическим: к примеру, для пяти сотен маршрутов время обработки увеличится до 6 суток (500 маршрутов × 18 минут). Схожая ситуация и

на стандартной обработке – разница в средних временах обработки для разных вариантов сценария может привести к задержке до 11 часов на один маршрут.

Таким образом, моделирование функционирования наземной космической инфраструктуры показало, что региональные элементы НКИ целесообразно использовать только для приема данных, а всю обработку проводить в ЦОД высокой производительности. Кроме того, создание в Европейской части резервного ЦОД следует осуществлять только при наличии канала связи высокой пропускной способности с основным ЦОД.

Заключение

Основной результат предложенной серии статей состоит в представлении новых научно обоснованных методологических основ для разрешения важной научной проблемы управления потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли, а также представлении новых технических решений, внедрение которых имеет существенное значение для совершенствования отечественной космической системы ДЗЗ, среди которых можно отметить следующие:

1) в интересах решения основной задачи впервые проведена декомпозиция космической системы ДЗЗ как сложной информационной организационно-технической системы;

2) сформулирована обладающая новизной математическая постановка оптимизационной задачи и определен перечень взаимосвязанным математических моделей, требующих разработки;

3) представлена единая математическая модель орбитальной группировки КА ДЗЗ;

4) предложена единая форма представления моделей обработки информации для космических аппаратов, наземных пунктов и линий связи как элементов единой космической системы ДЗЗ;

5) продемонстрирован новый программно-моделирующий комплекс для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ;

6) существенную практическую значимость имеют результаты, подтверждающие состоятельность предложенного подхода к решению научной проблемы управления потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли.

Список литературы / References

1. Starkov AV, Emelianov AA, Grishantseva LA, Zubkova KI, Morozov AA, Trishin AA. Methodology for managing the flows of target information in the remote sensing space system. Part 1. Task formalization. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(1): 54–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-54-64>

Старков А.В., Емельянов А.А., Гришанцева Л.А., Жуковская К.И., Морозов А.А., Тришин А.А. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Ч. 1. Формализация задачи // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 1. С. 54–64. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-54-64>

2. Starkov AV, Emelianov AA, Grishantseva LA, Zubkova KI, Morozov AA, Trishin AA. Methodology for managing the flows of target information in the remote sensing space system. Part 2. Interrelated mathematical models systems formation. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):148–161. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-2-148-161>

Старков А.В., Емельянов А.А., Гришанцева Л.А., Жуковская К.И., Морозов А.А., Тришин А.А. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Ч. 2. Формирование системы взаимосвязанных математических моделей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 148–161. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-2-148-161>

3. Emelyanov AA, Malyshev VV, Smolyaninov YuA, Starkov AV. *Control of target information flows in the functioning of the space system of remote sensing of the Earth*. Moscow: Izdatel'stvo MAI Publ.; 2020. (In Russ.)

Емельянов А.А., Мальшев В.В., Смолянинов Ю.А., Старков А.В. Управление потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во МАИ, 2020. 232 с.

4. Emelianov AA, Grishantseva LA, Zubkova KI, Malyshev VV, Nguyen VHN, Starkov AV, Zay YW. Mathematical model of ERS data processing ground segment operation in terms of processing distribution. *Advances in the Astronautical Sciences*. 2020;170:495–504.

5. Leun EV, Leun VI, Sysoev VK, Zanin KA, Shulepov AV, Vyatlev PA. The active control devices of the size of products based on sapphire measuring tips with three degrees of freedom. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;944:012073. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012073>

6. Zanin KA, Moskatinev IV. Improvement of methods for evaluating the resolving power of a space synthetic aperture radar. *Solar System Research*. 2018;52(7): 666–672. <https://doi.org/10.1134/S00380946180702137>

7. Zay YW, Malyshev VV, Bobronnikov VT, Starkov AV. The joint solution of problem of evasion and keeping in a neighborhood reference orbit. *Advances in the Astronautical Sciences*. 2020;170:433–442.
8. Malyshev VV, Starkov AV, Fedorov AV. Orbital corrections of space vehicles while performing dynamic operations. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2013.52(2):313–325. <https://doi.org/10.1134/S1064230713010085>
9. Malyshev VV, Starkov AV, Zay YW. The decision of problems of evasion when holding the geostationary satellites in the neighborhood of the reference orbit. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2018;10(13):53–58.
10. Razoumny Y, Razoumny V, Kozlov P, Baranov A, Varatharajoo R. Method of optimization of the servicing space-based system orbits and detached units maneuvers parameters in the problem of on-orbit-servicing of the given multi-satellite space infrastructure. *67th International Astronautical Congress, IAC 2016*. Guadalajara; 2016.
11. Baranov AA, Razoumny VY, Razoumny YN, Malyshev VV. Low orbit spacecraft service planning. *Proceedings of the 68th International Astronautical Congress, IAC 2017: Unlocking Imagination, Fostering Innovation and Strengthening Security, Adelaide, SA, September 25–29, 2017*. Adelaide; 2017. p. 835–844.
12. Baranov AA, Grishko DA, Mayorova VI. The features of constellations' formation and replenishment at near circular orbits in non-central gravity fields. *Acta Astronautica*. 2015;116:307–317. <https://doi.org/10.1016/j.actastro.2015.06.025>
13. Krasilshchikov MN, Malyshev VV, Fedorov AV. Autonomous implementation of dynamic operations in a geostationary orbit. I. Formalization of control problem. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2015;54(6):916–930. <https://doi.org/10.1134/S1064230715060118>
14. Voikovskii AP, Krasilshchikov MN, Malyshev VV, Fedorov AV. Autonomous implementation of dynamic operations in a geostationary orbit. II. Synthesis of control algorithms. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2016;55(6):948–968. <https://doi.org/10.1134/S1064230716060113>
15. Petukhov VG. Application of the angular independent variable and its regularizing transformation in the problems of optimizing low-thrust trajectories. *Cosmic Research*. 2019;57(5):351–363. <https://doi.org/10.1134/S001095251905006X>
16. Ivanyukhin AV, Petukhov VG. Low-energy sub-optimal low-thrust trajectories to libration points and halo-orbits. *Cosmic Research*. 2019;57(5):378–388. <https://doi.org/10.1134/S0010952519050022>
17. Petukhov VG, Ivanyukhin AV, Sang Wook W. Joint optimization of control and main trajectory and design parameters of an interplanetary spacecraft with an electric propulsion system. *Cosmic Research*. 2019;57:188–203. <https://doi.org/10.1134/S0010952519030079>
18. Grechkosev AK, Krasil'shchikov MN, Kruzhkov DM, Mararescul TA. Refining the Earth orientation parameters onboard spacecraft: concept and information technologies. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020;59(4):598–608. <https://doi.org/10.1134/S106423072004006119>
19. Golubev SI, Malyshev VV, Piyavskii SA, Sypalo KI. Decision making in multicriteria problems at the image design stage of aviation rocket technique. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020;59(2):223–231. <https://doi.org/10.1134/S1064230720020057>
20. Brusov VS, Korchagin PO, Malyshev VV, Piyavsky SA. Advanced “confident judgments” method when choosing multicriteria solutions in a multipurpose approach. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020;59(1):83–94. <https://doi.org/10.1134/S106423072001004921>.
21. Tohijan OO, Kurlykov AM, Rajchenko BV. The main trends in the development of Russian ground-based means of targeted use of remote sensing satellite from space. *Distancionnoe Zondirovanie Zemli iz Kosmosa v Rossii*. 2020;(1):48–53. (In Russ). Available from: <https://www.roscosmos.ru/media/img/2020/May/zurnal.dzz.v.rossii.1.vipusk.2020.pdf> (accessed: 18.08.2021).

Тохиан О.О., Курлыков А.М., Райченко Б.В. Основные тенденции развития российских наземных средств целевого применения космических аппаратов ДЗЗ из космоса // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России. 2020. № 1. С. 48–53. URL: https://www.roscosmos.ru/media/pdf/dzz/dzz-2020-01_n.pdf (дата обращения: 18.08.2021).

Сведения об авторах

Старков Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Системный анализ и управление», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4. ORCID: 0000-0002-2332-904X, Scopus ID: 56205648500, eLIBRARY SPIN-код: 5242-3413. E-mail: starkov@goldstar.ru

Емельянов Андрей Александрович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора, Научно-исследовательский институт точных приборов, Российская Федерация, 127490, Москва, ул. Декабристов, вл. 51. Scopus ID: 57214857574, eLIBRARY SPIN-код: 4484-1479. E-mail: info@niitpr.ru

Гришанцева Любовь Александровна, кандидат физико-математических наук, начальник сектора Научного центра оперативного мониторинга Земли, АО «Российские космические системы», Российская Федерация, 127490, Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25. ORCID: 0000-0003-4012-4086, Scopus ID: 14026859900, eLIBRARY SPIN-код: 9940-8756. E-mail: contact@spacecorp.ru

Жуковская Ксения Ивановна, ведущий инженер-программист, Научный центр оперативного мониторинга Земли, АО «Российские космические системы», Российская Федерация, 127490, Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25. ORCID: 0000-0002-1969-8176, eLIBRARY SPIN-код: 4805-5960. E-mail: contact@spacecorp.ru

Морозов Александр Андреевич, инженер-исследователь 1 категории, Научный центр оперативного мониторинга Земли, АО «Российские космические системы», Российская Федерация, 127490, Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25. ORCID: 0000-0002-9325-3829, eLIBRARY SPIN-код: 1394-5795. E-mail: contact@spacecorp.ru

Тришин Алексей Александрович, студент кафедры «Информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4. ORCID: 0000-0001-8876-5945. E-mail: trishin0202@mail.ru

About the authors

Alexander V. Starkov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of System Analysis and Management, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-2332-904X, Scopus ID: 56205648500, eLIBRARY SPIN-code: 5242-3413. E-mail: starkov@goldstar.ru

Andrey A. Emelyanov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Scientific Center for Operational Monitoring of the Earth, Joint Stock Company “Research Institute of Precision Instruments,” 51 Dekabristov St, Moscow, 127490, Russian Federation. Scopus ID: 57214857574, eLIBRARY SPIN-code: 4484-1479. E-mail: info@niitp.ru

Lyubov A. Grishantseva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Sector of the Scientific Center for Operational Monitoring of the Earth, Joint Stock Company “Russian Space Systems,” 51 Dekabristov St, bldg 25, Moscow, 127490, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-4012-4086, Scopus ID: 14026859900, eLIBRARY SPIN-code: 9940-8756. e-mail: grishantseva_la@ntsomz.ru

Ksenia I. Zhukovskaya, lead software engineer, Scientific Center for Operational Monitoring of the Earth, Joint Stock Company “Russian Space Systems,” 51 Dekabristov St, bldg 25, Moscow, 127490, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-1969-8176, eLIBRARY SPIN-code: 4805-5960. E-mail: zubkova.k@ntsomz.ru

Alexander A. Morozov, research engineer of the 1st category, Scientific Center for Operational Monitoring of the Earth, Joint Stock Company “Russian Space Systems,” 51 Dekabristov St, bldg 25, Moscow, 127490, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-9325-3829, eLIBRARY SPIN-code: 1394-5795. E-mail: aamorozko@mail.ru

Alexey A. Trishin, student, Department of Information and Control Systems of Aircraft, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-8876-5945. E-mail: trishin0202@mail.ru