




DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-139-147

УДК 528.8.04

Научная статья / Research article

Оценка влияния текущих метеопрогнозов в задаче планирования космической съемки

П.Е. Розин , Ю.А. Смольянинов  

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4
 E-mail: smolyaninov-77@psk-net.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 3 марта 2021 г.

Доработана: 12 апреля 2021 г.

Принята к публикации: 15 мая 2021 г.

Аннотация. Статья посвящена актуальной задаче планирования работы группы разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Описывается укрупненный алгоритм решения задачи планирования для разнотипных КА. Результат укрупненного алгоритма ищется в виде совокупности опорных планов для групп однотипных КА, прореженной за счет удаления части конфликтующих операций сброса данных зондирования. Характеристики разрабатываемых планов в значительной мере зависят от используемой методики учета влияния облачности. Исследуется возможность реализации методики, основанной на применении скачанных из Интернета файлов текущих метеопрогнозов гидрометцентров, в виде специального приложения. Проводится проверка созданного приложения на скачанных с американского сервера реальных данных гидрометцентра, которые охватывают большой регион, включающий европейскую часть Евразии и часть Африки. С помощью приложения, моделирующего распределение точек внутри региона, оценивается число точек, накрытых слабой облачностью (20% или менее). По результатам моделирования установлено, что доля доступных для съемки точек лежит в интервале от примерно четверти до трети. На основе полученных количественных оценок делается вывод о том, что учет влияния облачности коренным образом меняет опорные планы, рассчитанные с учетом только освещенности, и влияет на структуру укрупненного алгоритма планирования.

Ключевые слова: космические аппараты дистанционного зондирования Земли, планирование космосъемки

Для цитирования

Розин П.Е., Смольянинов Ю.А. Оценка влияния текущих метеопрогнозов в задаче планирования космической съемки // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 139–147. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-139-147


© Розин П.Е., Смольянинов Ю.А., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Assessment of the impact of current weather forecasts in the task of space survey planning

Peter E. Rozin , Yuri A. Smolyaninov  

Moscow Aviation Institute (National Research University),
4 Volokolamskoe Shosse, 125993, Moscow, Russian Federation
 E-mail: smolyaninov-77@psk-net.ru

Article history

Received: March 03, 2021

Revised: April 12, 2021

Accepted: May 15, 2021

Abstract. The article is devoted to the actual task of planning the work of a group of different types of spacecraft for remote sensing of the Earth. An enlarged algorithm for solving the planning problem for different types of spacecraft is described. The result of the enlarged algorithm is sought in the form of a set of reference plans for groups of similar spacecraft, thinned out by removing some of the conflicting operations of resetting the sensing data. The characteristics of the developed plans largely depend on the methodology used to account for the impact of cloud cover. The possibility of implementing a methodology based on the use of files of current weather forecasts of hydrometeorological centers downloaded from the Internet in the form of a special application is investigated. The created application is being tested on the real data of the hydrometeorological center downloaded from the American server, which covers a large region, including the European part of Eurasia and part of Africa. An application that simulates the distribution of points within a region estimates the number of points covered by weak cloud cover (20% or less). Based on the results of the simulation, it was found that the proportion of points available for shooting lies in the range from about a quarter to a third. Based on the obtained quantitative estimates, it is concluded that taking into account the influence of cloud cover radically changes the reference plans calculated taking into account only illumination, and affects the structure of the enlarged planning algorithm.

Keywords: space survey planning, assessing the impact of cloud cover

For citation

Rozin PE, Smolyaninov YuA. Assessment of the impact of current weather forecasts in the task of space survey planning. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):139–147. (In Russ.) doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-139-147

Введение

Наращивание орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), реализуемое в рамках Федеральной космической программы России на 2016—2025 годы, и увеличение ее производительности влечет значительное увеличение объемов принимаемых данных. В условиях существенного увеличения отечественной ОГ за счет ввода новых КА, оснащенных различными типами аппаратуры ДЗЗ, важнейшим вопросом является обеспечение согласованного, планомерного целевого

применения разнотипных КА за счет разработки специализированного программного обеспечения (СПО). Создание такого СПО непременно должно включать математические модели, позволяющие учитывать влияние облачности при разработке оперативных планов функционирования ОГ. Задача настоящего исследования состоит в получении количественных оценок влияния облачности при использовании одной из возможных методик, основанной на применении скачанных из Интернета файлов текущих метеопрогнозов.

1. Задача планирования космосъемки

Целевое функционирование орбитальной группировки заключается в периодически повторяющейся совместной реализации программы съемки заданного множества земных объектов и программы сброса данных зондирования на пункты приема информации (ППИ) наземной инфраструктуры на заданном временном интервале. Единичная операция съемки завершается регистрацией отснятого сюжета (данных зондирования) в виде цифрового снимка в бортовом запоминающем устройстве (БЗУ). Серия последовательных снимков одного КА формирует поток данных, объем которого может быть велик.

Число объектов, подлежащих съемке, также может быть достаточно большим. Поскольку низкоорбитальные КА группировки за сутки совершают более 15 витков по орбитам, то в зависимости от длительности интервала планирования количество потенциальных съемок земных объектов может составить сотни и тысячи единиц, что приводит к многовариантности формирования съемочных планов. Однако на число потенциальных съемок с использованием оптико-электронной аппаратуры существенное влияние может оказать облачность. Интересно оценить, насколько существенно такое влияние. Вместе с тем требования к экономической эффективности обуславливают необходимость формирования таких планов, реализация которых обеспечивает максимальную ценность информации о снятых земных объектах в условиях ограниченных возможностей бортовых информационных комплексов КА по ее сбору, хранению и передаче. Для формализации задачи планирования в работах [1; 2] введены в рассмотрение модель временных последовательностей возможной съемки объектов и сеансов связи и модели целевого функционирования бортовых информационных комплексов КА. Последние описывают меняющиеся состояния БЗУ и процессы переориентации съемочной аппаратуры каждого КА группировки. На основе математической формализации осуществляется переход к оптимизационной задаче дискретного программирования (задаче маршрутизации), заключающейся в поиске такой программы управления бортовой съемочной аппаратурой КА, которая обеспечивает максимум критерию эффективности целевого функциониро-

вания — совокупной ценности космоснимков — при ограничениях, накладываемых внешней средой (освещенность, облачность) и ограниченных технических возможностях каждого КА.

В составе отечественной орбитальной группировки эксплуатируются КА ДЗЗ трех типов: «Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М», работающих на солнечно-синхронных орбитах. Их движение описывается моделью в виде системы дифференциальных уравнений для околокруговых орбит, входящей в состав СПО. С вводом в эксплуатацию КА «Арктика-М» набор моделей движения, необходимых для корректного описания изменившейся структуры ОГ, следует дополнить моделью движения по высокоэллиптическим орбитам.

Укрупненный алгоритм решения задачи планирования для группы разнотипных КА предлагается выполнять поэтапно, а именно:

1) решением задачи дискретного программирования строятся опорные планы в виде временной последовательности координатно привязанных операций съемки и сброса для каждой группы однотипных КА с учетом освещенности, но при отсутствии облачности;

2) по набору найденных расчетных точек и интервалов съемки выполняется прогноз количества облачности в пределах интервала планирования и часть операций съемки, не удовлетворяющих ограничениям по облачности, из планов исключается;

3) прореженные опорные планы для групп однотипных КА объединяются в хронологически упорядоченную последовательность целевых операций ОГ, внутри которой выявляются и устраняются (при наличии) возможные конфликты на проведение операций сброса данных зондирования на ППИ. В итоге некоторая часть операций сброса из объединенного плана исключается;

4) прореженный объединенный план рассматривается как решение задачи планирования для группы разнотипных КА и для него вычисляются частные показатели эффективности, оценивающие расчетные доли участия каждого КА и каждого ППИ в выполнении скоординированного плана.

Решение задачи планирования позволяет формировать циклограммы работы целевой аппаратуры каждого КА группировки и каждого ППИ в течение интервала планирования.

Для выполнения расчетов на втором этапе важно выбрать реализуемую программно методикой учета прогнозируемого состояния облачности.

2. Современные подходы к оценке облачного покрова для систем космосъемки

В настоящее время существует несколько подходов к оценке облачности при планировании космосъемки. Эти подходы можно условно разделить на два вида:

1) статистические модели, базирующиеся на априорном знании параметров облачности на длительном интервале наблюдений, например, математическая модель облачного покрова, описывающая распределение количества облачности над районами съемки с помощью карт зон однородности, зависящих от сезона [3];

2) модели облачности, базирующиеся на данных гидрометеорологических центров, представленные в виде таблиц с прогнозом процента облачного покрова для заданного участка земной поверхности. Как правило, интервал прогноза покрывает потребности как оперативного планирования (1—3 суток), так и среднесрочного планирования (до 10 суток) космосъемки. Прогнозируемые по данным моделям текущие метеопараметры распространяются метеорологическими службами как на платной, так и бесплатной основе.

К недостаткам первой модели относятся: невысокая точность прогноза по отношению ко второму виду моделей, обобщение процента облачного покрова для больших площадей, порядка десятков миллионов квадратных километров. Обобщение прогноза на больших площадях затрудняет применение таких моделей для спутников высокодетальной съемки, поле зрения оптической аппаратуры которых не превышает сотен квадратных километров. Кроме того, для использования таких моделей необходимо вначале провести обработку данных об облачности с формированием матриц перехода, что является отдельной достаточно трудоемкой задачей.

Достоинством является автономность прогноза облачности, когда после статистической обработки данных не требуется доступа к данным гидрометцентра.

Данная статистическая модель представляется в виде абсолютно случайной последовательности или

цепи (при интервалах между наблюдениями, превышающих время корреляции процесса), а также марковской цепи или дискретного марковского процесса (при малых интервалах между наблюдениями). Съемка «точечного» объекта в момент t или площадного на интервале (t_1, t_2) считается возможной, если разыгрываемое с помощью датчика случайных чисел (ДСЧ) количество облачности над центром района съемки не превышает заданное. Применение ДСЧ предполагает наличие статистических данных о пространственно-временных распределениях облачности. Другими словами, подход, основанный на формировании карт зон однородности, требует трудоемкой обработки многолетних статистических данных о глобальном сезонном распределении облачности по результатам наземных и спутниковых наблюдений. Он позволяет получать оценки количества облачности лишь в среднем по зонам, имеющим весьма значительные площади, без учета текущих метеопрогнозов, характеризующихся достаточно подробным разрешением по времени и конкретной координатной привязкой.

К достоинствам второго рода моделей относится их более высокая точность прогноза, достаточно высокое временное и пространственное разрешение (карта прогноза $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ по широте и долготе). К недостаткам можно отнести необходимость постоянной связи с гидрометеорологическими службами, которые непосредственно обеспечивают формирование прогноза. Данные прогнозы базируются на самых современных алгоритмах, которые используются в мировых гидрометцентрах, а не просто на статистических характеристиках процессов, полученных по результатам обработки данных многолетних измерений. Именно использование таких данных является наиболее перспективным и современным подходом.

Стандартным представлением метеоданных, которые формируют гидрометцентры, является GRIB-файл. GRIB (GRIdded Binary) — математический формат сжатых данных, используемый для хранения исторических и прогнозируемых данных о погоде. Он был стандартизирован комиссией по основным системам Всемирной метеорологической организации, известен под номером GRIB FM 92-IX и описан в 306 номере руководства ВМО по кодам. В настоящее время существует три версии GRIB. Версия 0 ограниченно используется в таких проектах, как TOGA, и больше

практически не применяется. Первая редакция (текущая подверсия — 2) используется во всем мире большинством метеорологических центров для вывода численного прогноза погоды. Новое поколение было введено как вторая редакция GRIB [4]¹. Данные файлы формируются по запросу клиентской программы на удаленном сервере гидрометеорологической службы и пересылаются по сети Ethernet на компьютер клиента. GRIB-файл, помимо параметров облачности, может включать в себя данные о температуре, ветре, осадках, толщине снежного покрова и многом другом. Кроме того, файл может быть сформирован как для специфической области, ограниченной прямоугольником с соответствующими вершинами (широта, долгота), так и для всей поверхности Земли. Интервал прогноза файла — 10 суток, разрешение на местности (для бесплатно распространяемых данных) варьируется от $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, до $3^\circ \times 3^\circ$

В контексте задачи планирования многие из этих данных являются излишними. Параметры облачности, необходимые для планирования, следует извлекать и считывать выборочно, т.е. данные из GRIB-файла, которые хранятся в нем в специальной двоичной структуре данных, требуют обработки и отбора.

После получения GRIB-файла становится возможным обработать эти данные для последующего использования в программном обеспечении задачи планирования. После обработки объем файла значительно уменьшается. Так, прогноз только облачности на 6 суток с шагом в 3 часа и разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ будет занимать примерно 3 Мбайт для всей территории России. Для их извлечения удобно воспользоваться свободно распространяемым модулем `wgrib` на языке СИ, который имеет открытый код. Использование данного программного модуля в собственной программе, а также построение на его базе собственных подпрограмм позволяет адаптировать код для применения в различных средах разработки и при создании кроссплатформенных приложений. Использование `wgrib` рекомендовано ФГБУ «Гидрометцентр России» (рекомендации даны на официальном сайте) [5; 6]².

Идея использования GRIB-файла в контексте задачи планирования космосъемки реализована в виде

адаптированного модуля `wgrib_m` и динамической библиотеки `cloud.dll`.

Рассмотрим тестовый пример. Сделаем запрос данных на сервер гидрометеорологической службы и получим GRIB-файл для прямоугольника, ограниченного широтным диапазоном от 68° до 39° с.ш. и диапазоном долгот от 44° до 93° в.д. Потребуем, чтобы файл содержал исключительно прогноз облачности на 10 суток вперед с шагом в 3 часа и разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Нанесем на график, имеющий размеры ограничивающего прямоугольника, данные прогноза облачности: синим — процент облачности от 100 до 70 %; голубым — процент облачности от 70 до 30 %; белым — процент облачности от 30 до 0 %.

На рис. 1 представлена карта облачности, построенная по данным прогноза на 3 часа по указанным выше параметрам для заданного долготно-широтного диапазона.

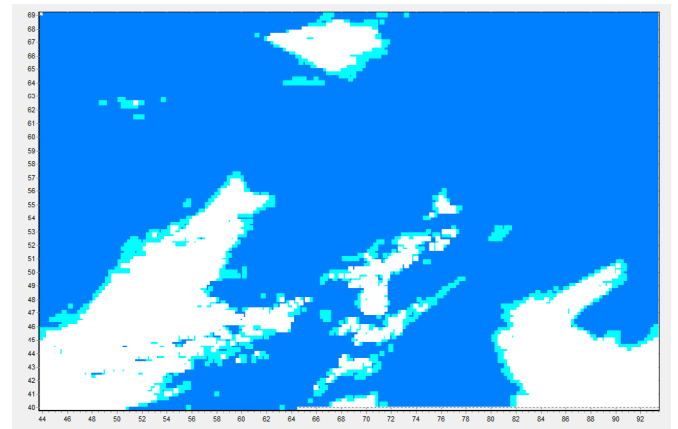


Рис. 1. Карта прогнозируемого распределения облачности для заданного региона (Авторский)

Figure 1. The map of predicted cloud distribution for the given region

Прогноз облачности можно осуществлять упрощенным образом, без интерполяции между временными интервалами. Либо осуществлять интерполяцию с использованием данных о конвективном теплообмене, скорости и направлении ветра, рельефе местности и т.п. В зависимости от требуемой точности можно использовать различные способы. В случае упрощения точность прогноза находится в пределах разрешающей способности GRIB-файла по времени и составляет

¹ GRIB. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/GRIB> (дата обращения: 01.03.2021).

² См.: URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib.html> (дата обращения: 01.03.2021); URL: <https://meteoinfo.ru/grib> (дата обращения: ссылка рабочая, проверена 18.04.2020).

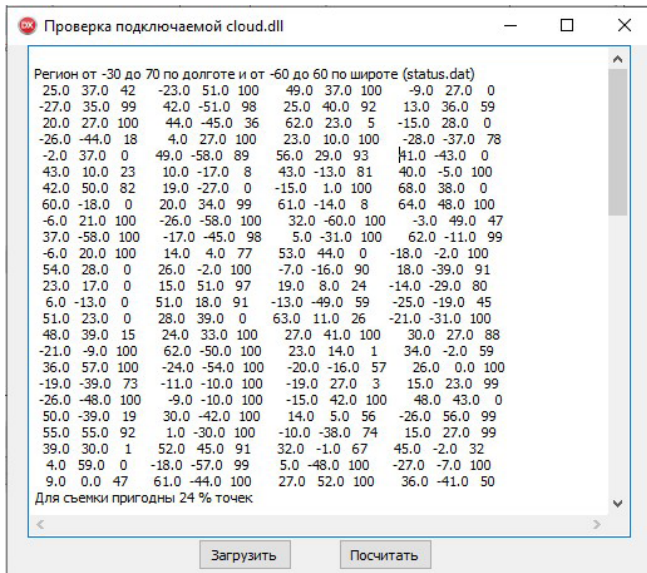
минимально 3 часа для бесплатных данных. Данное упрощение может приводить к существенным ошибкам на пограничных областях, т.е. в тех областях, где между соседними областями прогноза сетки поверхности плотность облачного покрова существенным образом отличается (на 50...70 %). Для таких областей параметры облачности могут меняться чрезвычайно интенсивно, что увеличивает ошибку прогноза. Предварительно данную ошибку можно оценить в 30...40 %. То есть, к примеру, если прогноз облачности по данным СПО был 40 %, при использовании более точных систем с интерполяцией он составит 70...80 %. Указанные ошибки характерны именно для пограничных с интенсивной облачностью районов.

Для второго теста взят файл wgrib.out, который содержит извлеченные из GRIB-файла данные о реальном состоянии облачности над регионом, охватывающим всю европейскую часть Евразии и лежащим в пределах от -30 до 70 градусов долготы и от -60 до 60 градусов широты на 18.04.2020. Координаты внутренних точек региона формируются с помощью ДСЧ в цикле из 100 реализаций. Для парирования влияния ДСЧ и целочисленности задаваемых координат расчеты повторены 10 раз. При таких условиях число

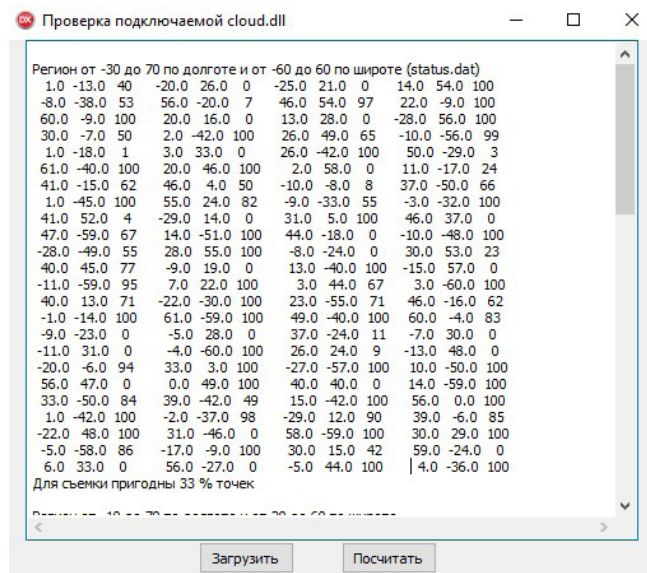
точек, накрытых облачностью не более 2 баллов (20 %), лежит в интервале от 24 (рис. 2, а) до 33 (рис. 2, б) со средним значением 28,3. Проведенная проверка работы библиотеки Cloud.dll на соответствующих данных показывает (рис. 2, а и б), что:

- а) подключение библиотеки Cloud.dll к СПО планирования проходит нормально;
- б) функция getCloud, формирующая процент облачности по заданным координатам точки и времени прогноза, работает удовлетворительно: любой точке из 100, лежащих внутри заданного региона, ставится в соответствие положительное число, лежащее в допустимых пределах — процент облачности; значение -1, свидетельствующее об ошибке, в результатах отсутствует;
- в) для съемки пригодны от четверти до трети из 100 просмотренных точек, выбранных с помощью ДСЧ (взят допустимый предел 2 балла из 10).

Для исследования влияния числа реализаций использован тот же GRIB-файл, но извлечение параметров облачности выполнено для региона меньшей площади, охватывающего Европу и лежащего в пределах от -10 до 70 градусов долготы и от 20 до 60 градусов широты на ту же дату 18.04.2020 года. Результаты 30 расчетов представлены в табл. 1.



а



б

Рис. 2. Оценка доли точек заданного региона, доступных для съемки, лежит в диапазоне от четверти до трети; а – худший из 10 просчитанных: 24 %, б – лучший из 10: 33 %

Figure 2. The estimate of the percentage of points in the given region available for shooting is in the range from a quarter to a third; а – the worst of 10 calculated: 24 %, б – the best of 10: 33 %

Еще один тест проведен на данных GRIB-файла, который определяет параметры облачности для региона, лежащего в пределах от -0 до -37 градусов долготы

и от -54 до 8 градусов широты на дату 04.03.2021 года. Результаты 30 расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 1

Оценка числа доступных для съемки точек

Table 1

Estimation of the number of points available for shooting		
Регион от $(-10, 20)$ до $(70, 60)$ – «Европа+», 18.04.20 Region from $(-10,20)$ to $(70,60)$ – «Europe+», 18.04.20		
Число точек Number of points	Число точек, накрытых слабой облачностью (20 % или менее) в 10 вариантах расчета The number of points covered with weak clouds (20 % or less) in 10 calculation options	Среднее значение Average value
100	43, 38, 34, 41, 48, 39, 33, 44, 47, 41	40.8
500	34, 35, 37, 34, 38, 35, 36, 38, 36, 41	36.4
1000	34, 36, 35, 38, 34, 36, 36, 35, 37, 37	35.8

Таблица 2

Оценка числа доступных для съемки точек

Table 2

Estimation of the number of points available for shooting		
Регион от $(-80, -54)$ до $(-37, 8)$ – «Южная Америка», 04.03.2021 Region from $(-80, -54)$ to $(-37, 8)$ – «South America», 04.03.2021		
Число точек Number of points	Число точек, накрытых слабой облачностью (20 % или менее) в 10 вариантах расчета The number of points covered with weak clouds (20 % or less) in 10 calculation options	Среднее значение Average value
100	18, 17, 24, 22, 15, 23, 30, 18, 22, 17	20.6
500	23, 23, 24, 21, 22, 23, 22, 20, 19, 21	21.8
1000	21, 19, 20, 21, 24, 23, 22, 20, 22, 20	21.2

Заключение

На основании проведенного инженерного исследования можно сделать следующие оценочные выводы:

- применение методики учета влияния облачности, основанной на загружаемых из Интернета текущих метеопрогнозах гидрометцентров, позволяет создать достаточно простое и вполне работоспособное программное обеспечение, пригодное для использования в задачах планирования космосъемки;
- учет влияния облачности может кардинально менять полученные оптимизацией опорные планы космосъемки, значительно уменьшая число возможных сеансов съемки в плане примерно на 65...80 %;
- влияние облачности на построение планов настолько велико, что, возможно, следует поменять местами этапы 1 и 2 в укрупненном алгоритме решения

задачи планирования, для чего требуется дополнительное исследование.

Список литературы

1. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2017. № 96. 11 с.
2. Малышев В.В., Дарных В.В. Оперативное планирование целевого функционирования космических систем наблюдения и связи. М.: Изд-во МАИ, 2017. 29 с.: ил.
3. Малышев В.В., Бобронников В.Т., Красильщиков М.Н., Нестеренко О.П., Федоров А.В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление. М.: Изд-во МАИ, 2000. 568 с.: ил.

4. Скобелев П.О., Скимунт В.К., Симонова Е.В., Жилиев А.А., Травин В.С. Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием мультиагентных технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 10 (171). С. 60—70.
5. Соллогуб А.В., Аншаков Г.П., Данилов В.В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли. М.: Машиностроение, 2009. 368 с.
6. Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Царев А.В., Степанов М.Е., Жилиев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1 (62). С. 16—26.
7. Усовик И. В., Дарнопых В.В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ // Труды МАИ. 2013. № 65. 31 с.
8. Globus A., Crawford J., Lohn J., Pryor A. Application of Techniques for Scheduling Earth-Observing Satellites // Proceedings of the 16th conference on Innovative applications of artificial intelligence. 2004. P. 836—843.
9. Xhafa F., Sun J, Barolli A., Biberaj A., Barolli L. Genetic algorithms for satellite scheduling problems // Mobile Information Systems. 2014. No. 8. P. 351—377.
10. Iacopino C., Palmer P., Policella N., Donati A., Brewer A. How ants can manage your satel-lites // Acta Futura. 2014. No. 9. P. 57—70.
11. Kebin G., Guohua W., Jianghan Z. Multi-Satellite Observation Scheduling Based on a Hybrid Ant Colony Optimization // Advances in Intelligent Systems Research. 2013. P. 532—536.
12. Li Y., Wang R., Xu M. Rescheduling of Observing Spacecraft Using Fuzzy Neural Network and Ant Colony Algorithm // Chinese Journal of Aeronautics. 2014. Vol. 27. Is. 3. P. 678—687. doi: 10.1016/j.cja.2014.04.027
13. Xiaolua L., Baocunb B., Yingwua Ch., Fenga Y. Multi satellites scheduling algorithm based on task merging mechanism // Applied Mathematics and Computation. 2014. No. 230. P. 687—700. doi: 10.1016/j.amc.2013.12.109
14. Dishan Q., Chuan H., Jin L., Manhao M. A Dynamic Scheduling Method of Earth-Observing Satellites by Employing Rolling Horizon Strategy // The Scientific World Journal. 2013. Article ID304047. doi: 10.1155/2013/304047
15. Wanga J., Zhua X., Yangb L., Zhua J., Maa M. Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites // Journal of Computer and System Sciences. 2015. No. 81. P. 110—124.

References

1. Emelyanov AA, Malyshev VV, Smolyaninov YuA, Starkov AV. Formalization of the problem of operative target functioning of diverse spacecraft for remote Earth probing. *Trudy MAI [Proceedings of the MAI]*. 2017;96:11. (In Russ.)
2. Malyshev VV, Darnopyh VV. *Operativnoe planirovanie celevogo funkcionirovaniya kosmicheskikh sistem nablyudeniya i svyazi [Operational planning of the targeted operation of space surveillance and communication systems]*. Moscow: MAI Publ.; 2017. (In Russ.)
3. Malyshev VV, Bobronnikov VT, Krasil'shchikov M N, Nesterenko OP, Fedorov AV. *Sputnikovye sistemy monitoringa. Analiz, sintez i upravlenie [Satellite monitoring systems. Analysis, synthesis, and management]*. Moscow: MAI Publ.; 2000. (In Russ.)
4. Skobelev PO, Skirmunt VK, Simonova EV, Zhilyaev AA, Travin VS. Planning for target application of a group of Earth remote sensing satellites using multi-agent technologies. *Izvestiya SFEDU. Engineering sciences*. 2015;10(171):60—70. (In Russ.)
5. Sollogub AV, Anshakov GP, Danilov VV. *Kosmitcheskie apparaty distancionnogo zondirovaniya Zemli [Spacecraft of Earth surface sensing systems]*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2009. (In Russ.)
6. Sollogub AV, Skobelev PO, Simonova EV, Tcarev AV, Stepanov ME, Zhilyaev AA. Intelligent system for distributed problem solving in cluster of small satellites for Earth remote sensing. *Information and control systems*. 2013;1(62):16—26. (In Russ.)
7. Usovik IV, Darnopyh VV. Avtomatizirovannyi programmnyi kompleks dlya parametritceskogo analiza i optimizatcii planirovaniya tcelevogo funkcionirovaniya kosmitcheskikh sistem DZZ [Automated software package for parametric analysis and optimization of planning of targeted functioning of remote sensing space systems]. *Trudy MAI [Proceedings of the MAI]*. 2013;65:31. (In Russ.)
8. Globus A, Crawford J, Lohn J, Pryor A. Application of Techniques for Scheduling Earth-Observing Satellites. *Proceedings of the 16th conference on Innovative applications of artificial intelligence*. 2004:836—843.
9. Xhafa F, Sun J, Barolli A, Biberaj A, Barolli L. Genetic algorithms for satellite scheduling problems. *Mobile Information Systems*. 2014;8:351—377.
10. Iacopino C, Palmer P, Policella N, Donati A, Brewer A. How ants can manage your satel-lites. *Acta Futura*. 2014;9:57—70.
11. Kebin G, Guohua W, Jianghan Z. Multi-Satellite Observation Scheduling Based on a Hybrid Ant Colony Optimization. *Advances in Intelligent Systems Research*. 2013:532—536. doi: 10.2991/isccca.2013.169

12. Li Y, Wang R, Xu M. Rescheduling of Observing Spacecraft Using Fuzzy Neural Network and Ant Colony Algorithm. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2014;27(3):678—687. doi: 10.1016/j.cja.2014.04.027

13. Xiaolua L, Baocunb B, Yingwua Ch, Fenga Y. Multi satellites scheduling algorithm based on task merging mechanism. *Applied Mathematics and Computation*. 2014;230:687—700. doi: 10.1016/j.amc.2013.12.109

14. Dishan Q, Chuan H, Jin L, Manhao M. A Dynamic Scheduling Method of Earth-Observing Satellites by Employing Rolling Horizon Strategy. *The Scientific World Journal*. 2013. Article ID304047. doi: 10.1155/2013/304047

15. Wanga J, Zhua X, Yangb L, Zhua J, Maa M. Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites. *Journal of Computer and System Sciences*. 2015;81:110—124.

Сведения об авторах

Розин Петр Евгеньевич, доцент кафедры 604 «Системный анализ и управление», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кандидат технических наук; ORCID: 0000-0001-8892-5566, eLIBRARI SPIN-код: 1671-7820; e-mail: rozinpe@rambler.ru

Смолянинов Юрий Алексеевич, доцент кафедры 604 «Системный анализ и управление», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кандидат технических наук; ORCID: 0000-0003-4735-1206, eLIBRARI SPIN-код: 9418-6061; e-mail: smolyaninov-77@psk-net.ru

About the authors

Peter E. Rozin, Associate Professor of the Department «System analysis and management», Moscow Aviation Institute (National Research University), PhD in Engineering; ORCID: 0000-0001-8892-5566, eLIBRARI SPIN-code: 1671-7820; e-mail: rozinpe@rambler.ru.

Yuri A. Smolyaninov, Associate Professor of the Department «System analysis and management», Moscow Aviation Institute (National Research University), PhD in Engineering; ORCID: 0000-0003-4735-1206, eLIBRARI SPIN-code: 9418-6061; e-mail: smolyaninov-77@psk-net.ru