

ОЦЕНКА ОПЕРАТИВНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НА-ГС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2019 г. С. А. Зотов^{1*}, Е. В. Дмитриев², С. Ю. Шибанов¹, В. В. Козодеров³, С. А. Донской⁴

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

² Институт вычислительной математики РАН, Москва

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Рослесинфорг», Москва

*E-mail: zotov.sa@mipt.ru

Поступила в редакцию 23.07.2018 г.

В рамках реализации программы по исследованию Земли из космоса на Российском сегменте Международной космической станции (МКС) будет произведен ввод в эксплуатацию гиперспектрального комплекса НА-ГС (научная аппаратура «Гиперспектрометр» производства НПО Лептон (г. Зеленоград, г. Москва) для экспериментальной отработки наземно-космической системы мониторинга и прогноза развития природных и техногенных катастроф. Практическое использование данной системы связано с решением задач тематической обработки гиперспектральных изображений, которые должны удовлетворять определенным критериям качества. В данной работе предлагается методика определения оперативных возможностей аппаратуры НА-ГС на основе данных имитационно-статистического моделирования. Концепция предлагаемой имитационно-статистической модели (ИСМ) включает возможность моделирования тестового полигона сложной формы, имитации наблюдения с помощью гиперспектрального комплекса отдельных частей полигона с задаваемой точностью, учет облачности и зенитного угла Солнца. Рассматривается влияние внешних условий наблюдения на качество гиперспектральных снимков. Проведены численные эксперименты для выбранных тестовых территорий. Анализ полученных результатов расчетов подтверждает достоверность предложенной методики.

Ключевые слова: оперативные возможности систем ДЗЗ, гиперспектральные изображения, имитационно-статистическое моделирование, тематическая обработка, оценка параметров лесных территорий

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019174-83>

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из наиболее актуальных направлений развития российских спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является внедрение космических гиперспектральных технологий (ГСТ), сочетающих в себе возможности получения информации об обследуемых объектах на основе пространственного анализа цифровых изображений и методов спектроскопии. Основное преимущество ГСТ состоит в том, что пользователю предоставляется наиболее подробная информация о спектральных характеристиках обследуемых объектов в пределах заданной точности. При этом отпадает необходимость в дополнительных предположениях относительно свойств объектов, введение которых зачастую вносит существенные неопределенности в решение соответствующих

задач. Использование ГСТ позволяет существенно повысить качественный уровень рассматриваемых задач классификации и определения характеристик обследуемых объектов по сравнению с тем, что можно получить при использовании стандартного индексного представления мультиспектральных данных.

Одной из важных задач, решаемых при вводе в эксплуатацию космических систем ДЗЗ, является оценка эффективности применения аппаратуры на заданном космическом аппарате (КА), которая включает в себя определение информативности, затратности и оперативности мониторинга (Бахвалов, 2015; Dash, Ogutu, 2016). Под оперативными возможностями орбитального средства ДЗЗ обычно подразумевается его способность выполнять некоторую задачу, в кратчайшие сроки. Как правило, для решения задачи тематической обработки необходимо наблюдать некоторую

территорию — тестовый полигон. Время выполнения задачи включает в себя время до появления территории тестового полигона в полосе захвата (ПЗ) прибора ДЗЗ, время передачи информации на Землю, ее обработки и др. Количественной характеристикой оперативности служит показатель оперативности (Куренков, 2006).

В данной работе предлагается методика оценки оперативных возможностей аппаратуры НА-ГС (научная аппаратура «Гиперспектрометр») на основе данных имитационно-статистического моделирования. НА-ГС в ближайшее время будет введена в эксплуатацию на Российском сегменте Международной космической станции (МКС). Основные компоненты НА-ГС — аппаратный модуль производства НПО Лептон (г. Зеленоград, г. Москва), специальный иллюминаторный кронштейн и вычислительно-управляющий модуль, разрабатываемые МФТИ.

Предполагаемым направлением использования НА-ГС является создание системы мониторинга и прогноза развития природных и техногенных катастроф. Обработка данной системы связана с решением задач тематической обработки гиперспектральных изображений, которые должны удовлетворять определенным критериям качества. При оценке оперативности выполнения тематической задачи мы будем считать, что задача выполнена, если в поле зрения гиперспектральной камеры (ГСК) попал заданный процент исследуемой территории, которую далее будем именовать как тестовый полигон, при соответствии внешних условий наблюдения заданным. Подзадачу передачи информации на наземную станцию и обработки полученных данных мы на данном этапе исключаем из рассмотрения. Разработанную модель оценки оперативных возможностей ГСК предполагается использовать при составлении программы испытаний НА-ГС и полетного задания экипажу МКС.

Опыт работ по оценке параметров перспективных спутниковых систем существует как в российской, так и мировой практике. В работе (Михеев и др., 2017) представлены результаты моделирования процессов мониторинга территории России с помощью многоспутниковой системы "Обзор-О", оснащенной широкозахватной оптико-электронной аппаратурой среднего разрешения. Получены оценки потоков видеoinформации для случая комплектации системы только мультиспектральными камерами и случая совместной работы с гиперспектральными камерами и инфракрасными (ИК) радиометрами. В работе (Obata et al., 2016) представлены результаты предварительной калибровки гиперспектральной спутниковой

аппаратуры HISUI (Hyperspectral Imager Suite), разработанной японским Министерством экономики, торговли и производства. В ближайшее время планируется отработка данной системы на японском модуле МКС JEM-EF (Japanese Experiment Module-Exposed Facility). Следует особо отметить, что в процессе такой калибровки будут применяться не только лабораторные методы, но также и различные подходы с использованием наземной и атмосферной информации. Планируется отработка функционирования встроенных бортовых систем калибровки.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОПЕРАТИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЗЗ

Оценка оперативных возможностей НА-ГС производится на основе имитационно-статистического моделирования при выполнении тематических задач. Имитационно-статистическая модель (ИСМ) должна воспроизводить движение соответствующего модуля МКС, осуществлять проверку покрытия получаемыми гиперспектральными изображениями обширной территории (так как линейный размер тестового полигона может быть много больше ширины ПЗ гиперспектрометра), рассчитывать показатель оперативности космической системы (КС) ДЗЗ с учетом внешних условий наблюдения при выполнении поставленной задачи тематической обработки. Оперативные возможности количественно характеризуются показателем оперативности, который представляет собой среднее время выполнения поставленной задачи (Бахвалов, 2015; Куренков, 2006). Считаем, что задача тематической обработки выполнена, если в поле зрения гиперспектрометра попал заданный процент исследуемой территории при соответствии внешних условий наблюдения заданным.

Будем искать показатель оперативности как статистическую величину. Следовательно, разрабатываемая модель должна моделировать процесс выполнения тематической задачи с помощью гиперспектрометра и накапливать информацию о ходе выполнения тематической задачи, формировать статистическую выборку, на основе которой будет рассчитываться показатель оперативности КС ДЗЗ с учетом внешних условий наблюдения.

Входные данные ИСМ

Для моделирования работы ГСК, установленного на некотором КА, и сбора данных, необходимых для решения некоторой задачи тематической обработки, требуются следующие данные:

1) параметры орбиты ИСЗ (искусственный спутник Земли), на котором установлен гиперспектрометр;

2) характеристики гиперспектрометра;

3) требования к внешним условиям;

4) параметры тестового полигона.

Разберем подробнее каждый из приведенных выше пунктов.

Для описания параметров орбиты моделируемого ИСЗ будем использовать данные в формате TLE (Two-Line Element). Они содержат параметры орбиты, однозначно определяющие положение ИСЗ. В открытом доступе на таких ресурсах, как www.celestrak.com и www.space-track.org, находятся актуальные данные о большинстве несекретных ИСЗ в формате TLE.

По этим параметрам можно однозначно прогнозировать положение ИСЗ на орбите. Существуют готовые модели движения ИСЗ по орбите, которые на входе принимают данные в формате TLE, например SGP4. Поэтому и из-за того, что данные о параметрах орбиты находятся в открытом доступе именно в таком формате, в разрабатываемом алгоритме на входе будут приниматься именно строки TLE.

Основные характеристики ГСК, влияющие на оперативность, — это угол поля зрения и средняя высота над поверхностью Земли, так как именно они определяют ширину ПЗ гиперспектрометра. Последнее скорее относится к характеристикам платформы КА и вычисляется по параметрам орбиты.

Разберем, какие внешние условия наблюдения существенно влияют на качество космической съемки и как их моделировать.

Существует множество факторов, влияющих на излучение, фиксируемое ГСК, а значит, и на измерение отражательной способности и спектра излучения поверхности Земли и объектов на ней. Среди этих факторов — зенитный угол Солнца и атмосферные явления.

Отражательная способность поверхностей, характеризующаяся коэффициентом отражения и альбедо, зависит от угла падения излучения на поверхность. Коэффициент отражения электромагнитных волн от поверхности определяется формулой Френеля, и по ней коэффициент отражения возрастает при увеличении угла падения волны. Для того чтобы однозначно определить спектр отражения излучения от поверхности Земли по гиперспектральным снимкам, сделанным при разных зенитных углах Солнца, производится радиометрическая коррекция. Радиометрическая коррекция учитывает зависимость коэффициентов отражения излучения от некоторой

поверхности Земли и угла падения излучения. Такая коррекция может проводиться только для снимков, которые были сделаны при зенитных углах Солнца, для которых известна зависимость отражательной способности снимаемой поверхности Земли. Получить информативные гиперспектральные снимки возможно только тогда, когда можно провести с ними радиометрическую коррекцию. Следовательно, гиперспектральную съемку следует проводить только при определенных зенитных углах Солнца, для которых известна отражательная способность поверхности (Ranson et al., 1986; Royer et al., 1985; Zanter, 2016). Таким образом, чтобы учесть требования к внешним условиям наблюдения при моделировании, следует задать допустимый диапазон зенитного угла Солнца, как правило, ограниченный нулем и некоторым максимальным значением, и максимальный балл облачности по некоторой шкале.

Из атмосферных явлений, которые влияют на оперативность ГСК, следует выделять наличие облачности. Для учета влияния облачности и тени от облаков при оценке оперативности выполнения некоторой тематической задачи следует установить максимальный допустимый уровень облачности по некоторой шкале и считать, что при большем уровне облачности съемка не проводится. Также во время моделирования съемки при допустимой, но не нулевой облачности, следует учитывать, что часть сканируемой местности может быть закрыта облаками или тенью с некоторой вероятностью. Сам уровень облачности генерируется случайным образом, в соответствии с некоторым распределением вероятности, которое необходимо задавать для каждого тестового полигона, с учетом внутригодовой изменчивости (в разное время года характерные уровни облачности могут быть разными). Итак, для статистического определения облачности над территорией тестового полигона требуется плотность распределения балльности облачности в заданном районе, причем желательно плотность распределения балльности по месяцам или другим годовым интервалам времени. Распределения могут быть сформированы на основе статистических данных о облачности за последнее время. Эти данные можно взять из открытых ресурсов: с веб-сайта gp5.ru или с веб-сайта Earth System Research Laboratory, которые предоставляют данные о погоде, собранные за продолжительное время наблюдений на метеостанциях.

Также для решения многих задач тематической обработки требуются гиперспектральные снимки, сделанные в определенное время года, например, когда поверхность Земли не покрыта снегом.

Поэтому можно ввести допустимый внутригодовой интервал наблюдений, ограниченный двумя порядковыми номерами дней в не високосном году, в который допустима гиперспектральная съемка с целью набора данных для решения заданной задачи тематической обработки.

Ключевая информация о тестовом полигоне — это его координаты, а точнее его границы. Координаты границ тестового полигона задаются в виде файла в формате SHP или KML.

Разработанная ИСМ является динамической (описывает поведения некоторой системы в течение продолжительных периодов времени). В качестве модельного времени (время, в единицах которого определено поведение всех объектов модели) для ИСМ используется время в формате UTC с пошаговым способом изменения. Для построения модели необходимо задать начальное и конечное модельное время в формате UTC, шаг изменения модельного времени (Аристов, 2003; Лычкина, 2012). Также для построения ИСМ задается мелкость разбиения тестовых полигонов по широте и по долготе и минимальный процент площади территории тестовых полигонов, который должен попасть в ПЗ, чтобы задача считалась выполненной.

Выходные данные ИСМ

В ходе моделирования в первую очередь необходимо задать начальное положение моделируемого КА. В этом качестве выбирается реальное положение последнего согласно имеющимся данным позиционирования в формате TLE. Далее по ходу движения ГСК по орбите определяется время выполнения тематической задачи с того момента времени, когда задача была выполнена последний раз. В итоге вычисляется среднеарифметическое время выполнения тематической задачи — оно и будет показателем оперативности ГСК. Для получения более полного представления о ходе выполнения задачи следует определять еще некоторые величины: медианное значение периода выполнения тематической задачи из статистической выборки, максимальное и минимальное значение времени выполнения тематической задачи за весь период накопления данных, дисперсия времени выполнения задач и среднеквадратическое отклонение. Для получения представления о статистическом распределении времени выполнения задачи, все собранные значения времени выполнения задачи представляются в виде гистограммы с некоторым разбиением.

Если задан годовой период наблюдения, то время между разными периодами наблюдения не

учитывается во времени между выполнением задачи и временем между проходами.

При принятии решений о целесообразности включения тематической задачи в космическую миссию также важно знать динамику сбора информации. Объем собранной информации будем измерять относительной величиной. Относительной величиной объема собранной информации будем называть отношение площади территории тестовых полигонов, покрытой ПЗ при соответствии всем внешним условиям наблюдения заданным, к полной площади всей территории тестовых полигонов. Для оценки динамики сбора информации будем записывать каждый момент времени, при котором территория любого тестового полигона попадает в ПЗ ГСК при допустимых условиях наблюдения, и величину объема, собранную за текущий шаг изменения модельного времени. По полученному списку можно построить график зависимости объема собранной информации от времени и график зависимости скорости сбора информации от времени.

Также, поскольку предполагается, что задача может выполняться не за один проход НА-ГС тестовых полигонов, важно представить информацию о периоде пролетов. Время прохода — время, когда какая-то часть тестового полигона попадает в ПЗ ГСК. Для его оценки вычисляется показатель периодичности проходов — среднее время между проходами тестовых полигонов. Как и при расчете показателя оперативности для показателя периодичности пролетов, также определяются медианное, максимальное, минимальное значение периода пролета, его дисперсия, среднеарифметическое отклонение, а также гистограммы плотности распределения.

По этим выходным данным можно прогнозировать и анализировать работу НА-ГС с известными характеристиками при выполнении заданной тематической задачи и сделать вывод о том, следует ли её включать в космическую миссию, как можно корректировать задачу, улучшить ГСК, орбитальную группировку и т.д.

Алгоритм имитационно-статистического моделирования

В основе алгоритма имитационно-статистического моделирования лежат следующие шаги: разбиение тестовых полигонов на сегменты; построение траектории движения ИСЗ ДЗЗ с помощью модели SGP4 с выбранным шагом изменения модельного времени между заданными начальным и конечным модельным временем и в заданный годовой период наблюдения; моделирование внешних условий наблюдения тестовых

полигонов для каждого отдельного прохода полигонов, а именно высоты Солнца над горизонтом и облачности; проверка соответствия внешних условий наблюдения допустимым при решении выбранной тематической задачи; проверка того, какие сегменты полигонов захватываются ПЗ ГСК; накопление данных на каждой итерации о ходе выполнения тематической задачи, т.е. о том, какой объем информации надлежащего качества был собран и в какое время, когда задача выполняется.

Разберем подробнее метод моделирования внешних условий.

Вычисление положения Солнца производится методами практической астрономии, описанными, например, в (Даффет-Смит, 1982).

Прогнозирование облачности осуществляется статистическим методом. По заданным статистическим данным по облачности составляется распределение вероятности появления облачности случайного балла по выбранной шкале для каждого из заданных периодов в году. Если в процессе работы модели моделируемый ИСЗ ДЗЗ приближается к одному из тестовых полигонов, то, в зависимости от номера дня, в который происходит приближение, выбирается соответствующая плотность распределения балльности облачности, и по ней определяется балл облачности над этим полигоном. Так и производится прогноз облачности над некоторой территорией в процессе моделирования выполнения тематической задачи.

Похожим образом моделируется частичное перекрытие полигона облаками и тенью облаков. В рамках рассматриваемой модели каждый тестовый полигон разбивается на отдельные части — сегменты. При необходимости моделирования закрытия облаками или тенью части полигона, для каждого сегмента статистически определяется, закрывается он в момент проведения съемки облаком или нет. Вероятность того, что сегмент закрыт облаком равняется проценту облачности над всем полигоном (тому проценту, который соответствует случайному баллу облачности), который обозначим, как p_{cl} . Допустим, что площадь тени от облаков равняется площади, закрытой облаками территории, и тогда вероятность того, что сегмент закрыт тенью от облаков p_{sh} равна p_{cl} . Но при этом облака могут закрывать от ГСК тень собой же. Поэтому вероятность того, что сегмент закрыт тенью от облаков, но не закрыт облаками, приблизительно p_{sh-cl} , равна $p_{sh-cl} = p_{cl}(1 - p_{cl})$ (считаем, что эти два события независимы). Таким образом, вероятность того, что некоторый небольшой участок тестового полигона закрыт от ГСК облаком или тенью от облаков p_{sh+cl} , равна $p_{sh+cl} = p_{cl}(2 - p_{cl})$.

ТЕСТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Приведем результаты использования модели для оценки оперативных возможностей гиперспектрального комплекса НА-ГС при решении некоторой тематической задачи. НА-ГС имеет две гиперспектральные камеры, работающие в БИК (0.90–1.60 мкм) и ВД (0.47–0.90 мкм) диапазонах со спектральным разрешением 25 и 30 нм, пространственным разрешением 45 и 70 м соответственно. Предполагается, что НА-ГС будет базироваться на борту МКС, средняя высота которого над поверхностью Земли около 400 км.

Будем оценивать оперативность НА-ГС при решении задач оценки лесистости, классификации отделов лесообразующих пород, классификации видового состава смешанных древостоев, классификации возрастных классов однородных древостоев. Выполняться эти задачи будут для лесов Валуйского района Белгородской области Российской Федерации. На рис. 1 приведен спутниковый снимок с обозначенными на нем тестовыми полигонами, для которых будет выполняться тематическая задача.

Приведем подробное описание входных данных, использованных при тестировании методики.

Данные TLE для МКС (ISS “ZARYA”) за 5 июня 2018 г., взятые из открытого источника — веб-сайта www.celestrak.com. Угол обзора обеих гиперспектральных камер НА-ГС составляет 3.5° .

В работе (Ranson et al., 1986) приведены исследования зависимости некоторых измеренных с помощью средств ДЗЗ вегетационных индексов пихтовых насаждений от зенитного угла Солнца в момент съемки. По данным из статьи, значения индексов существенно уменьшаются, когда зенитный угол Солнца становится больше 75° и зависимости при таких условиях просто не приводятся, вероятно потому, что освещенность лесных массивов в этом случае становится недостаточной и определение вегетационных индексов невозможно. Предположительно, это условие справедливо для любых лесов и лесных насаждений, а при зенитном угле Солнца менее 75° проведение радиометрической коррекции возможно. Поэтому в качестве максимального допустимого зенитного угла Солнца, при котором возможна гиперспектральная съемка с помощью НА-ГС, был выбран угол в 75° .

В качестве максимального допустимого процента покрытия неба облаками было установлено значение 30%, т.е. 3 балла облачности по десятибалльной шкале. Наиболее важный период для определения параметров древостоев — это период активной вегетации, проходящий с мая по сентябрь. Поэтому предполагается проводить оценку оперативных

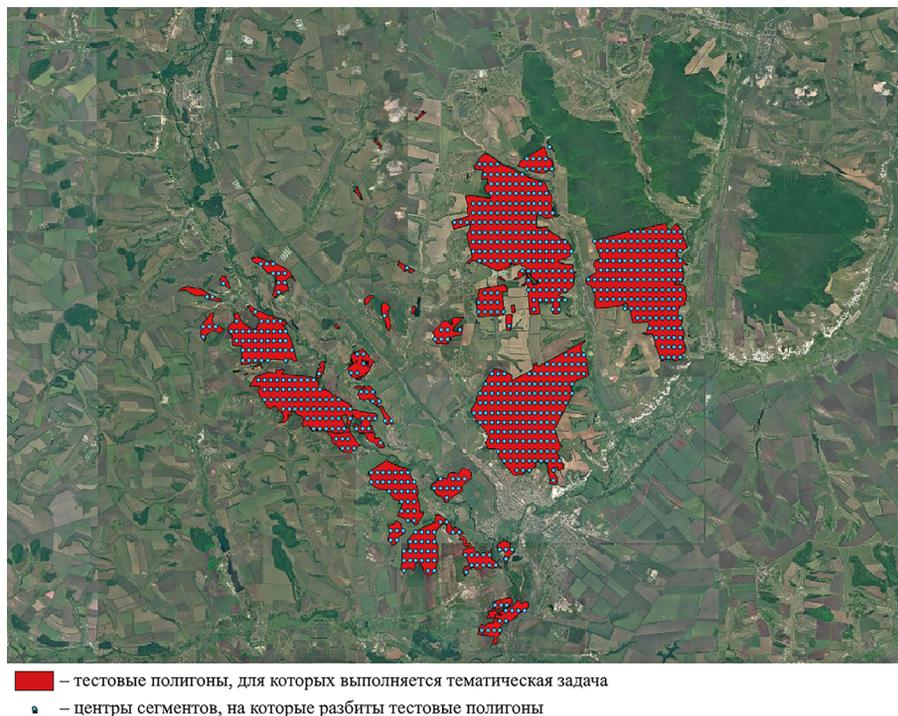


Рис. 1. Спутниковый снимок лесов Валуйского р-на Белгородской обл. РФ охватывает территорию от 50.127° до 50.467° с.ш. с юга на север и от 37.680° до 38.415° в.д. с запада на восток (взят с бесплатного сервиса Google Maps). На снимке обозначены тестовые полигоны, для которых выполняется тематическая задача, и центры сегментов, на которые полигоны разделены. Каждый сегмент простирается на 0.005° широты с юга на север и на 0.005° долготы с запада на восток.

возможностей НА-ГС только с 1 мая (121 день в не високосном году) по 30 сентября (273 день в не високосном году). Для произведения оценки оперативности НА-ГС при выполнении поставленной задачи был взят shape-файл (файл в формате SHP), содержащий полигоны, обводящие территорию тестовых полигонов (красные области на рис. 1).

Для определения плотности распределения балльности облачности над территориями заданных тестовых полигонов были использованы статистические данные по проценту покрытия неба облаками за период с начала 2007 по конец 2017 гг. на территории, пролегающей от 49.5° по 51° с.ш. с юга на север и от 37.25° до 39° в.д. с запада на восток. Данные взяты с веб-сайта Earth System Research Laboratory из набора данных NCEP Reanalysis Daily Averages. Набор включает средние результаты по облачности на каждый день выше обозначенного периода. Эти данные были усреднены по области. Затем все получившиеся усредненные значения были округлены с точностью до 10% и по ним вычислялись распределения вероятности выпадения балла облачности по десятибалльной шкале для каждого месяца в году. Получившиеся распределения приведены в табл. 1. Для каждого тестового полигона распределения одинаковы, так как они находятся достаточно близко друг к другу. По

табл. 1 видно, что максимальная вероятность выпадения допустимого балла облачности, при котором будет проводиться съемка (3 балла), в августе — около 44%, минимальное — в январе и составляет около 28%. Среднее значение за все время — около 36.25%.

За начальное модельное время было взято начало дня, которым датированы имеющиеся данные в формате TLE, подаваемые на вход, т.е. 0:00:00 5 июня 2018 г. Для получения более точных результатов требуется накопить как можно больше данных, а для этого должно быть задано как можно большее конечное модельное время. Предполагаем, что достаточно десяти лет. Тогда конечным модельным временем будет 0:00:00 5 июня 2028 г. За шаг изменения модельного времени взята одна секунда.

За мелкость разбиения тестовых полигонов на сегменты по широте и долготе были приняты 0.005° . В этом случае каждый сегмент представляет из себя прямоугольник размером, приблизительно, $560 \text{ м} \times 870 \text{ м}$ с юга на север и с запада на восток, соответственно. Ширина ПЗ НА-ГС включает, приблизительно, 24 диагонали таких прямоугольников (если считать, что МКС пролетает над полигонами на высоте 400 км). Все тестовые полигоны при таком разбиении делятся на 724 сегмента, площадь каждого из которых составляет

Таблица 1. Распределения вероятности выпадения балла облачности над тестовыми полигонами по десятибалльной шкале для каждого месяца в году. Строки — распределения для каждого месяца, столбцы — балл по десятибалльной шкале. Все данные приведены с точностью до сотых, но при моделировании использовались более точные значения

Месяцы	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Январь	0.04	0.05	0.08	0.11	0.12	0.12	0.13	0.11	0.11	0.08	0.06
Февраль	0.02	0.11	0.10	0.12	0.13	0.14	0.13	0.07	0.10	0.07	0.02
Март	0.04	0.07	0.14	0.14	0.14	0.10	0.14	0.09	0.07	0.04	0.03
Апрель	0.01	0.06	0.11	0.13	0.16	0.16	0.18	0.10	0.07	0.03	0.00
Май	0.01	0.06	0.14	0.10	0.15	0.17	0.18	0.13	0.06	0.09	0.00
Июнь	0.00	0.07	0.16	0.13	0.16	0.16	0.12	0.11	0.09	0.01	0.00
Июль	0.01	0.10	0.14	0.14	0.13	0.14	0.15	0.10	0.07	0.01	0.00
Август	0.01	0.16	0.17	0.15	0.17	0.11	0.11	0.06	0.04	0.01	0.00
Сентябрь	0.01	0.10	0.18	0.15	0.14	0.11	0.11	0.09	0.06	0.03	0.03
Октябрь	0.01	0.09	0.18	0.12	0.16	0.09	0.13	0.09	0.06	0.06	0.01
Ноябрь	0.01	0.12	0.15	0.12	0.08	0.09	0.16	0.12	0.07	0.07	0.01
Декабрь	0.01	0.08	0.10	0.13	0.13	0.13	0.10	0.12	0.08	0.10	0.02

Таблица 2. Результаты вычисления оперативности НА-ГС при решении тематической задачи при различных условиях наблюдения

Наименование параметра	Без учета внешних условий наблюдения	С учетом зенитного угла Солнца	С учетом облачности	С учетом зенитного угла Солнца и облачности
<i>Время до решения тематической задачи, сут</i>				
Среднее	23.6	54.2	93.0	261.5
Медианное	16.6	34.3	89.5	268.4
Максимальное	132.1	338.9	139.1	352.1
Минимальное	0.9	3.0	42.3	145.0
Дисперсия	22.9	66.2	34.4	93.6
Среднеквадр. откл.	4.8	8.1	5.9	9.7
<i>Период прохода МКС полигонов, сут</i>				
Среднее	7.5	16.3	8.0	17.7
Медианное	4.9	7.9	5.0	9.8
Максимальное	78.7	128.2	78.7	128.2
Минимальное	1.1	1.1	1.1	1.1
Дисперсия	8.8	22.4	9.1	23.0
Среднеквадр. откл.	3.0	4.7	3.0	4.8
<i>Всего за время моделирования</i>				
Задача была решена	69	30	16	6
Проходов тестовых полигонов	222	102	30	94

примерно 0.0014% площади всех тестовых полигонов. На рис. 1 голубыми точками обозначены центры сегментов на территории тестовых полигонов. За минимальный процент просканированной площади полигона, при котором задача считается выполненной, были взяты 90%.

В табл. 2 приведен ряд статистических параметров, рассчитанных с помощью имитационно-

статистического моделирования (параметры приведены выше). Также в данной таблице приведено, сколько всего раз была выполнена тематическая задача за десятилетний период, и сколько раз полигоны попадали в ПЗ при надлежащих внешних условиях наблюдения. Для проведения анализа оперативности с учетом всех внешних условий также приведем графики зависимости скорости

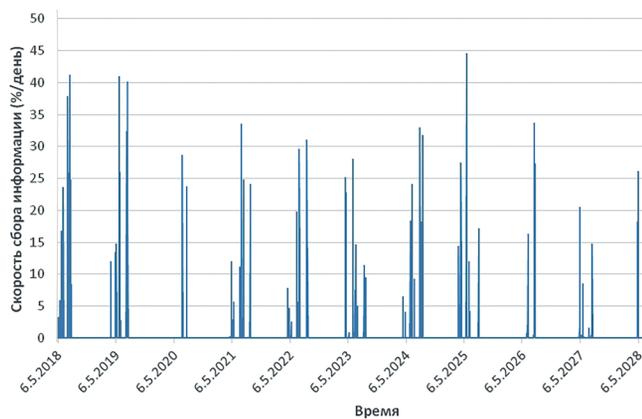


Рис. 2. Зависимость скорости сбора информации от времени при оценке оперативности НА-ГС.

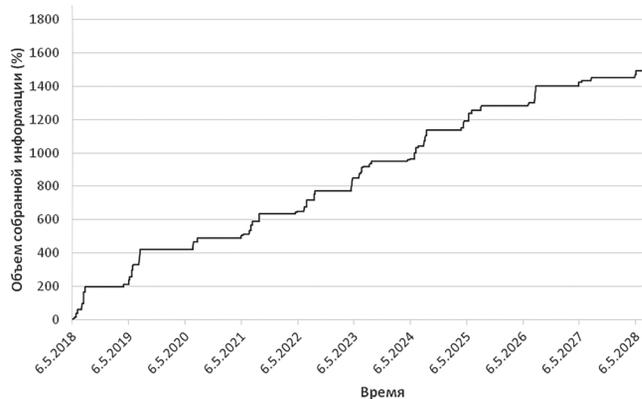


Рис. 3. Зависимости объема собранной информации от времени при оценке оперативности НА-ГС.

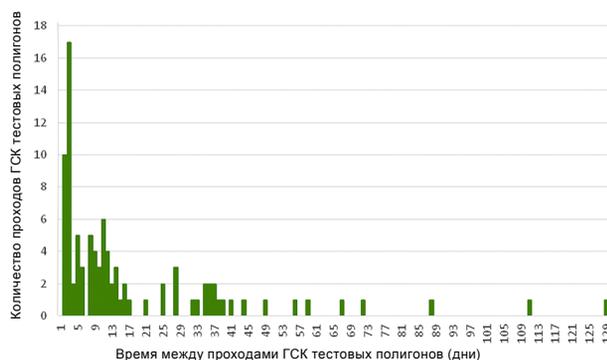


Рис. 4. Гистограмма распределения периодов между проходами ГСК тестовых полигонов с шагом разбиения в одни сутки.

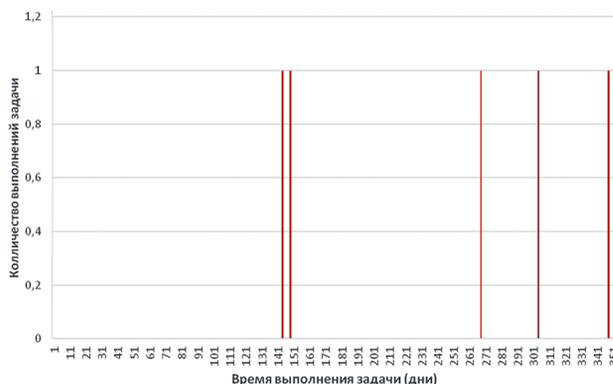


Рис. 5. Гистограмма распределения времени выполнения задачи шагом разбиения в одни сутки.

сбора и объема информации от времени (рис. 2 и 3), а также гистограммы плотности распределения периодов между проходами ГСК тестовых полигонов и времени выполнения задачи (рис. 4 и 5).

Проанализируем результаты вычислений. По графику на рис. 2 видно, что за один пролет (предположительно в день МКС пролетает над полигонами не более одного раза) сканируется не более 44% от общей территории тестовых полигонов. На графике зависимости объема собранной информации от времени (рис. 3) видно, что общий объем собранной информации на протяжении всего моделируемого периода приблизительно равномерно растет. Данные, представленные на рис. 4, показывают, что чаще всего проходы МКС тестовых полигонов повторялись на третий день, при этом в 89% период между проходами составлял менее 40 дней.

Согласно этим вычислениям, показатель оперативности НА-ГС при решении поставленной тематической задачи равен 261.540 сут, что

также близко к медианному значению, равному 268.391 сут (см. табл. 2). Годовой период, в который следует проводить наблюдение (с 1 мая по 30 сентября), составляет 152 сут, и было бы предпочтительно, чтобы задача была выполнена в этот срок, так как к наступлению следующего периода в следующем году уже собранные данные могут устареть. 152 сут существенно меньше, чем ожидаемый срок выполнения задачи. Но минимальное время выполнения задачи — 144.982 сут, а на гистограмме распределения времени выполнения задачи с учетом зенитного угла Солнца и облачности (см. рис. 5) видно, что два раза задача была выполнена менее, чем за 152 сут. Значит, вероятность выполнения поставленной задачи за один год приблизительно равна 33%.

Дополнительно для проверки методики провели следующий эксперимент. С ресурса www.celestrak.com был загружен архив данных TLE для МКС за весь 2017 г., по которому положение МКС на орбите Земли определялось за год

1278 раз, т.е. три-четыре раза за сутки или каждые 6–8 ч.

Далее была реализована модификация ИСМ, которая выполняет все функции основной модели, но в качестве исходных данных TLE она использует строки из архива за 2017 г. с меньшей и самой близкой эпохой к текущему модельному времени. Таким образом, прогноз положения МКС делается не более, чем на 8 ч, поэтому отклонение расчетного положения МКС от реального минимально.

С помощью этой модификации были произведены расчеты частоты прохода МКС тестовых полигонов и частоты выполнения тематической задачи с помощью системы НА-ГС, если бы она была установлена на борту МКС за 2017 г. Согласно вычислениям, при допустимом значении зенитного угла Солнца над полигонами (не меньше 75°) и в допустимый годовой интервал времени МКС пролетала над тестовыми полигонами (таким образом, чтобы НА-ГС захватывало хотя бы какую-то часть полигонов) 13 раз со средним периодом 10.500 сут, а задача могла быть решена три раза со средним периодом 38.722 сут.

По результатам вычислений оперативности НА-ГС с учетом зенитного угла Солнца, но без учета облачности, среднее время между пролетами — 16.302 сут со среднеквадратичным отклонением 4.729 сут, среднее время между решениями — 54.165 сут со среднеквадратичным отклонением 8.135 сут. Результаты тестового расчета за 2017 г. соответствуют приведенным выше результатам вычислений оперативности по “правилу трех сигм”. Таким образом, можно сделать вывод, что результаты расчета оперативности НА-ГС реалистичны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа существующих методов оценки оперативности данных космической аппаратуры ДЗЗ предложена ИСМ, адаптированная для перспективной гиперспектральной системы космического базирования НА-ГС. Концепция ИСМ включает возможность моделирования тестового полигона сложной формы, имитации сканирования гиперспектральным комплексом отдельных частей полигона с задаваемой

точностью, учет облачности и зенитного угла Солнца при наблюдении. Разработаны новые программные реализации методов и алгоритмов оценки оперативности проведения съемок подстилающей поверхности. В дальнейшем они будут использоваться при составлении полетного задания для космонавтов-операторов комплекса НА-ГС и планировании экспериментов по исследованию Земли из космоса в будущих проектах лаборатории “ЭЛФОКС”. Проведены вычисления для выбранных тестовых территорий. Приведенные результаты тестовых экспериментов подтверждают достоверность предложенной модели.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16–11–00007) и гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19–01–00215).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аристов С.А.* Имитационное моделирование экономических процессов. Екатеринбург: Уральский гос. эконом. ун-т, 2003. 121 с.
- Бахвалов Ю.О., Хатулев В.А., Завора Ю.И., Михеев О.В., Судаков В.М.* Новые возможности имитационно-статистического моделирования для оценивания эффективности космических систем ДЗЗ // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 5. С. 44–50.
- Даффет-Смит П.* Практическая астрономия с калькулятором. М.: Мир, 1982. 175 с.
- Куренков В.И., Салмин В.В., Абрамов Б.А.* Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения. Самара: Самарск. гос. аэрокосм. ун-т, 2006. 296 с.
- Лычкина Н.Н.* Имитационное моделирование экономических процессов. М.: ИНФРА-М, 2012. 254 с.
- Ranson K.J., Daughtry C.S.T., Bieh L.L.* Sun Angle, View Angle, and Background Effects on Spectral Response of Simulated Balsam Fir Canopies // Photogr. Engin. & Rem. Sens. May 1986. V. 52. № 5. P. 649–658.
- Royer A., Vincent P., Bonn F.* Evaluation and Correction of Viewing Angle Effects on Satellite Measurements of Bidirectional Reflectance // Photogr. Engin. & Rem. Sens. December 1985. V. 51. № 12. P. 1899–1914.
- Zanter K.* Landsat 8 (L8) Data users handbook. Dep. Interior U.S. Vers. 2.0. Geological Survey. Vers. 2.0. March 2016. 98 p.

Operational Capability Assessment for the Hyperspectral Sensor NA-GS Using Statistical and Simulation Modeling

S. A. Zotov^{1*}, E. V. Dmitriev², S. U. Shibano¹, V. V. Kozoderov³, S. A. Donskoy⁴

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology (State University)*

² *Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow*

³ *M.V. Lomonosov Moscow State University*

⁴ *Federal State Budgetary Institute "Lesinforg", Moscow*

*E-mail: zotov.sa@mipt.ru

Within the framework of the program on Earth remote sensing from space, the hyperspectral camera NA-GS (scientific instrument "Hyperspectrometer") produced by NPO Lepton (Zelenograd, Moscow) will be installed on the Russian segment of the International Space Station (ISS) for experimental testing of the ground-space system for monitoring and forecasting natural and man-made disasters. The practical use of this system is associated with solving certain problems of thematic processing hyperspectral images that must meet certain quality criteria. In this paper, we propose a technique for determining the operational capabilities of NA-GS instrument based on statistical simulation modeling (SSM) data. The concept of the proposed SSM includes the ability to perform model experiments for a test polygon of complex shape, simulation of hyperspectral imaging of selected parts of the polygon with a specified accuracy, and taking into account the clouds and the zenith angle of the sun. The influence of external observation conditions on the quality of hyperspectral images is considered. Numerical experiments were carried out for selected test areas. The analysis of the results obtained confirms reliability of the proposed technique.

Keywords: operational capabilities of remote sensing systems, hyperspectral images, simulation modeling, thematic processing, assessment of forest parameters

REFERENCES

- Aristov S.A.* Imitatsionnoye modelirovaniye ekonomicheskikh protsessov. [Simulation of economic processes.] Yekaterinburg: Ural'skiy gos. ekonom. un-t, 2003. 121 s. (In Russian).
- Bakhvalov Yu.O., Khatulev V.A., Zavora Yu.I., Mikheyev O.V., Sudakov V.M.* Novyye vozmozhnosti imitatsionno-statisticheskogo modelirovaniya dlya otsenivaniya effektivnosti kosmicheskikh sistem DZZ [New possibilities of simulation simulation for estimation of the efficiency of ERS space systems] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2015. № 5. S. 44–50. (In Russian).
- Daffet-Smit P.* Prakticheskaya astronomiya s kal'kulyatorom. [Practical astronomy with a calculator.] M.: Mir, 1982. 175 s. (In Russian).
- Kurenkov V.I., Salmin V.V., Abramov B.A.* Osnovy ustroystva i modelirovaniya tselevogo funktsionirovaniya kosmicheskikh apparatov nablyudeniya: uch. pos. [Fundamentals of the device and modeling of the objective functioning of spacecrafts of observation: uch. pos.] Samara: Samarsk. gos. aerokosm. un-t, 2006. 296 s. (In Russian).
- Lychkina N.N.* Imitatsionnoye modelirovaniye ekonomicheskikh protsessov. [Simulation modeling of economic processes] M.: INFRA-M, 2012. 254 s. (In Russian).
- Ranson K.J., Daughtry C.S.T., Bieh L.L.* Sun Angle, View Angle, and Background Effects on Spectral Response of Simulated Balsam Fir Canopies // Photogr. Engin. & Rem. Sens. May 1986. V. 52. № 5. P. 649–658.
- Royer A., Vincent P., Bonn F.* Evaluation and Correction of Viewing Angle Effects on Satellite Measurements of Bidirectional Reflectance // Photogr. Engin. & Rem. Sens. December 1985. V. 51. № 12. P. 1899–1914.
- Zanter K.* Landsat 8 (L8) Data users handbook. Dep. Interior U.S. Vers. 2.0. Geological Survey. Vers. 2.0. March 2016. 98 p.