

Оценка проектных характеристик низкоорбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

М. А. Иванушкин^{1,2}, О. Д. Жалдыбина¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, 443086, Россия

² Институт систем обработки изображений — Самара, НИЦ «Курчатовский институт», Самара, 443001, Россия
E-mail: ivanushkin.ma@ssau.ru

Цель работы состоит в оценке проектных характеристик низкоорбитальных группировок космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли. Выполнен анализ процесса формирования информационного потока оптико-электронной аппаратурой низкоорбитальных КА. Представлены результаты расчёта информационного потока для трёх значений высоты функционирования сверхнизкоорбитального малого КА, функционирующего на высоте ниже 400 км, оснащённого мультиспектральными и панхроматическим фоточувствительными элементами. Проведён выбор орбитальных параметров группировки низкоорбитальных КА, обеспечивающих квазинепрерывный обзор поверхности Земли. Получены оптимальные по Парето значения высоты орбиты и наклона, обеспечивающие максимальную площадь покрытия поверхности Земли одним КА при минимальной периодичности наблюдения. Выполнена оценка периодичности наблюдения локальных районов Земли, а также оценка оперативности доставки информации группировкой низкоорбитальных КА. Получены оптимальные по Парето решения для многоспутниковых систем, обеспечивающих периодичность наблюдения менее 2,5 ч при глобальном наблюдении. Получены зависимости, описывающие информационный обмен между КА и наземным пунктом приёма информации. В результате получены зависимости, позволяющие определить требуемые характеристики бортового запоминающего устройства и передающей аппаратуры КА, а также сформулировать требования к наземным приёмным пунктам космической информации.

Ключевые слова: информационный поток, оптико-электронная аппаратура, космическая система, дистанционное зондирование Земли

Одобрена к печати: 26.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-85-96

Введение

Современное состояние развития космических систем (КС) дистанционного зондирования (ДЗЗ), в составе которых используется высокопроизводительная съёмочная аппаратура и актуальный тренд на создание многоспутниковых систем наблюдения приводят к существенному росту объёмов накапливаемой в системе информации. Задача распределения потоков целевой информации при функционировании КС ДЗЗ решалась в работах (Емельянов и др., 2018, 2019а, б; Малышев и др., 2000). Изучению вопросов планирования работы системы информационного взаимодействия внутри кластера малых космических аппаратов (КА) с учётом оценки его робастности посвящены работы (Потюпкин и др., 2017; Сологуб и др., 1993; Ширококов, Шинкаренко, 2015). Вопросам повышения эффективности информационного обмена между наземным и космическим сегментом путём использования межспутниковых линий связи посвящены работы (Карсаев, 2018, 2019; Araniti et al., 2004; Ekić et al., 2001).

В настоящей работе в качестве модельного примера рассматривается группировка КА, функционирующих на высоте ниже 400 км. Выбору проектных характеристик аппарата, способного стать основой такой группировки, посвящены работы (Волоцув, 2021, 2023). Конструктивно-компоновочная схема аппарата, предложенная в публикации (Волоцув,

2021), позволяет использовать оптико-электронную аппаратуру (ОЭА) с большим фокусным расстоянием, что обеспечивает получение снимков с разрешением около 0,5 м на пиксель. Такое разрешение и высокая скорость движения подспутниковой точки, характерная для КА, функционирующих на низких орбитах, приводят к росту объёмов производимой ОЭА информации. Другой причиной роста объёмов информации ДЗЗ является увеличение количества используемых спектральных каналов, в работе (Ivliev et al., 2024) отмечается проблема несоответствия объёмов генерируемой информации гиперспектральной ОЭА спутника и скорости передачи на наземный пункт приёма. Решением проблемы может стать обеспечение информационного баланса (Ivliev et al., 2022) бортового запоминающего устройства (БЗУ), системы передачи информации (СПИ) и наземного пункта приёма информации (НППИ).

В связи с этим актуальной становится задача определения проектных параметров БЗУ и СПИ, способных обеспечить своевременную передачу полученной в системе информации ДЗЗ. В настоящей работе проведён анализ информационного потока, генерируемого ОЭА наблюдения, и предложен способ, позволяющий проводить оценку информационного обмена между КА и НППИ.

Анализ параметров целевого информационного потока от аппаратуры наблюдения

Космический аппарат ДЗЗ в процессе своего целевого функционирования обеспечивает накопление информации, которую генерирует съёмочная аппаратура. Объём накопленной информации ($V_{\text{ОЭА}}$) выразим как произведение информационного потока, который генерируется ОЭА за единицу времени ($I_{\text{ОЭА}}$), на длительность маршрута съёмки ($t_{\text{съёмки}}$):

$$V_{\text{ОЭА}} = I_{\text{ОЭА}} t_{\text{съёмки}}; \quad I_{\text{ОЭА}} = \frac{V_{\text{ОЭА}}}{t_{\text{съёмки}}} = \frac{L_{\text{ПЗС}} \cdot V_{\text{п.т}}}{x \cdot y} b k_{\text{сж}},$$

где $V_{\text{п.т}}$ — скорость движения подспутниковой точки; x, y — размеры пикселя фотоприёмного устройства; $L_{\text{ПЗС}}$ — длина ПЗС-линейки (прибор с зарядовой связью); b — разрядность выходного сигнала ОЭА; $k_{\text{сж}}$ — коэффициент сжатия.

В табл. 1 представлены результаты расчёта информационного потока для трёх значений высоты функционирования сверхнизкоорбитального малого КА, работающего на высоте ниже 400 км (Волоцуев, 2021) и оснащённого мультиспектральными (МС) и панхроматическим (ПХ) фоточувствительными элементами. Эквивалентное фокусное расстояние системы — 10 м, а угол поля зрения объектива составляет 1,5°.

Таблица 1. Результаты расчёта информационного потока

Вариант	№ 1	№ 2	№ 3
Высота орбиты $H_{\text{орб}}$, км	250	300	350
Полоса захвата, км	6,545	7,857	9,163
Разрешение ПХ, пиксель 6×6 мкм, м	0,150	0,180	0,210
« 7×7 мкм, м	0,175	0,210	0,245
« 8×8 мкм, м	0,200	0,240	0,280
« 9×9 мкм, м	0,225	0,270	0,315
Информационный поток ПХ, Гбит/с (ГБ/с)	21,71 (2,714)	17,89 (2,236)	15,16 (1,895)
Информационный поток МС, Гбит/с (ГБ/с)	9,649 (1,206)	7,951 (0,994)	6,739 (0,842)

Выбор орбитальных параметров группировки сверхнизкоорбитальных КА, обеспечивающих квазинепрерывный обзор

В рамках настоящего раздела рассматривается процесс выбора орбитальных параметров группировки сверхнизкоорбитальных КА, обеспечивающих квазинепрерывный обзор. При определении данных параметров будем использовать следующие предположения: орбиты КА круговые одинаковой высоты $H_{\text{орб}}$ и наклоения i ; КА группируются в m плоскостях по n КА в каждой плоскости; распределение плоскостей по долготе восходящего узла Ω равномерное; распределение КА в каждой плоскости по аргументу широты u равномерное; углы обзора ОЭА всех КА ДЗЗ одинаковы.

Для оценки функционирования КА в качестве объектов наблюдения в программное обеспечение Russian Space System Developer (RSSD) (Ткаченко и др., 2023) были внесены координаты пересечения долготы и широты с шагом в 6° (рис. 1а).

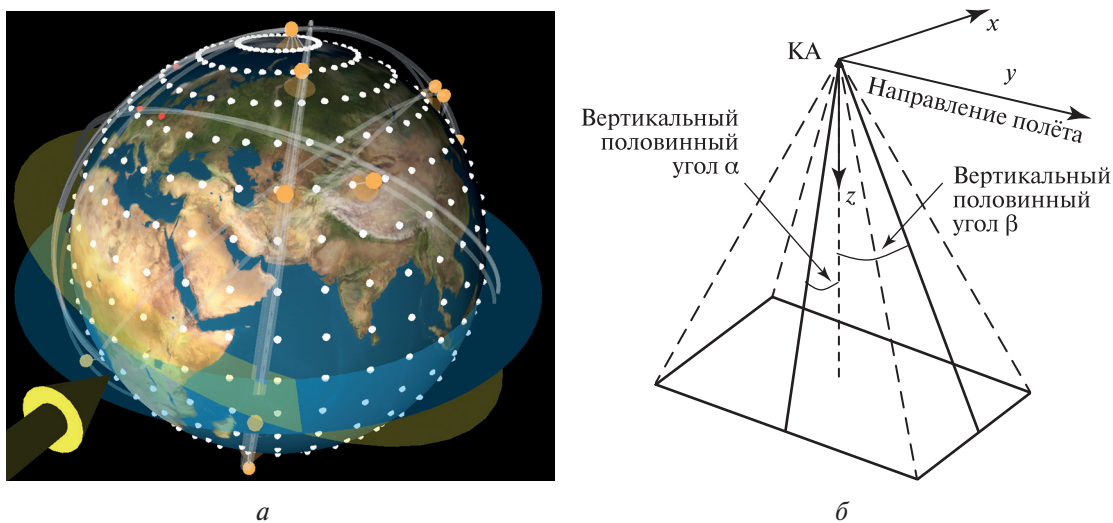


Рис. 1. Расположение сетки объектов наблюдения на поверхности Земли

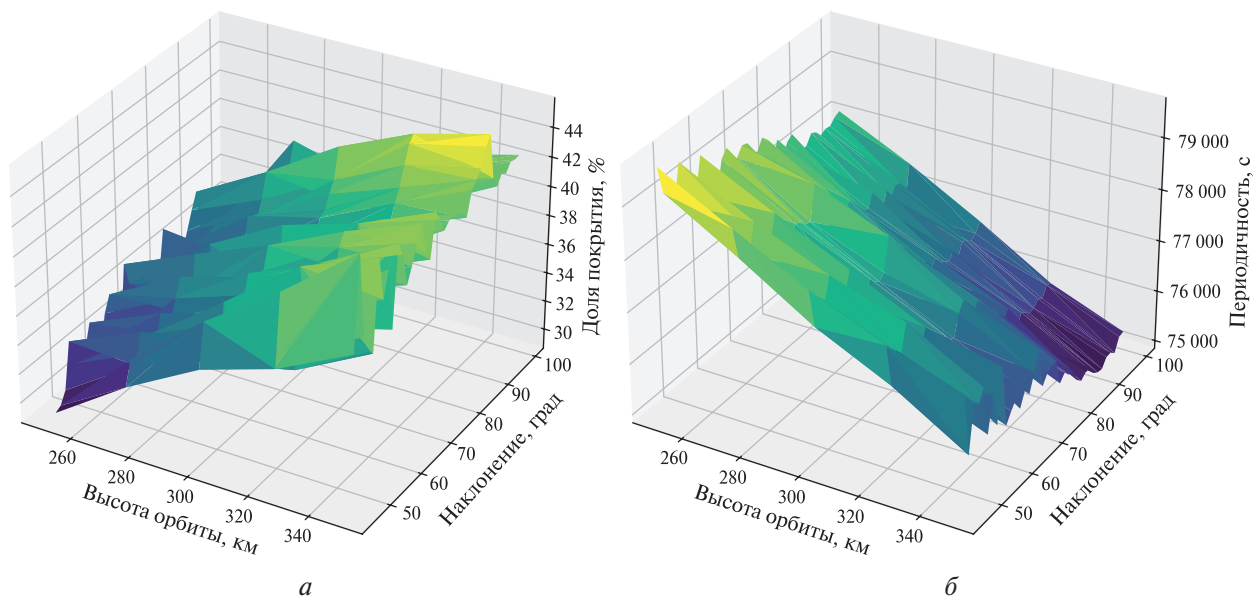


Рис. 2. Зависимость от высоты орбиты и наклоения: а — доли покрытия (в %); б — средней периодичности наблюдения

Оценка факта попадания объекта наблюдения в зону обзора целевой аппаратуры наблюдения происходит путём проекции возможной зоны обзора ОЭА на поверхность Земли (см. рис. 1б). Зона обзора ОЭА определяется как сумма половины угла поля зрения ОЭА и угла по крену (вертикальный половинный угол α) и как сумма половины угла поля зрения ОЭА и угла по тангажу (вертикальный половинный угол β), для определения поля зрения вдоль направления полёта. Высота орбиты $H_{орб}$ принимает значения от 250 до 350 км. Наклонение i меняет своё значение в диапазоне от 45 до 98°.

На основе вышесказанного было проведено имитационное моделирование функционирования одних суток полёта КА для расчёта таких параметров функционирования, как доля покрытия поверхности Земли и средняя периодичность наблюдения (рис. 2, см. с. 87).

Из графика можно сделать вывод, что доля покрытия увеличивается вместе с ростом высоты орбиты и достигает максимальных значений при наклонении от 85 до 97°. Наилучшие значения средней периодичности наблюдения также находятся при наклонении от 85° до 97° и высоте орбиты от 340 до 350 км.

Сузить выбор целевой орбиты для единичного КА можно, получив множество оптимальных по Парето решений. В рассматриваемой задаче критериями оптимальности являются: периодичность наблюдения $t_{пер} \rightarrow \min$, доля покрытия $cov \rightarrow \max$. На рис. 3 приведён график зависимости периодичности наблюдения от доли покрытия (в %), красным на рисунке выделены значения оптимальные по Парето.

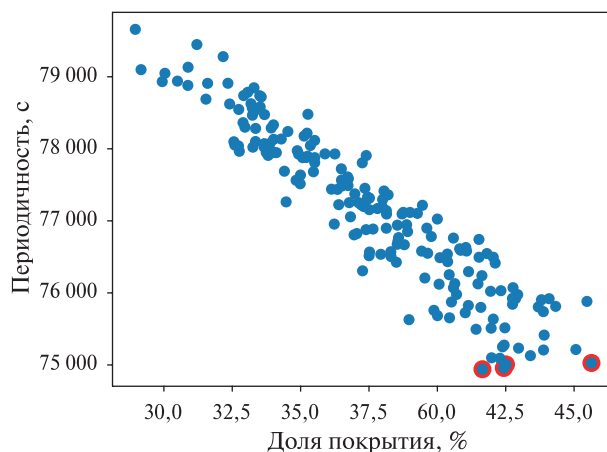


Рис. 3. Периодичность наблюдения

В табл. 2 приведены оптимальные по Парето значения высоты орбиты и наклонения, обеспечивающие максимальную площадь покрытия поверхности Земли одним КА при минимальной периодичности наблюдения.

Таблица 2. Оптимальные по Парето решения для единичного КА

Номер варианта	Высота орбиты, км	Наклонение, град	Средняя периодичность наблюдения, с	Доля покрытия поверхности Земли, %
1	350	88,5	75027,41470	45,63544784
2		90,0	74958,08065	42,43101474
3		91,5	74940,19930	41,64977653
4		93,0	75092,73568	42,28612650
5		94,5	75099,30973	41,98343113
6		96,0	75007,24866	42,50968582

Таким образом, для дальнейших расчётов в качестве основного примем вариант № 6, сочетание высоты орбиты и наклона которого соответствуют солнечно-синхронной орбите, что является наиболее предпочтительным для группировок ДЗЗ (Аджян и др., 2004).

Оценка периодичности наблюдения локальных районов Земли группировкой сверхнизкоорбитальных КА

При построении КС, обеспечивающих квазинепрерывный обзор поверхности Земли (Можаев, 1989; Walker, 1984) необходимо гарантировать минимальную периодичность наблюдения при минимальном количестве задействованных КА. При этом следует учитывать, что для сокращения затрат на выведение и поддержание КС также следует минимизировать количество плоскостей. На *рис. 4* представлена зависимость средней периодичности наблюдений и доли (в %) покрытия Земли от изменения количества плоскостей в составе КС и количества КА в каждой плоскости соответственно.

На *рис. 5* показана средняя периодичность наблюдений, красным цветом на графике выделены оптимальные по Парето решения, учитывающие приведённые выше критерии.

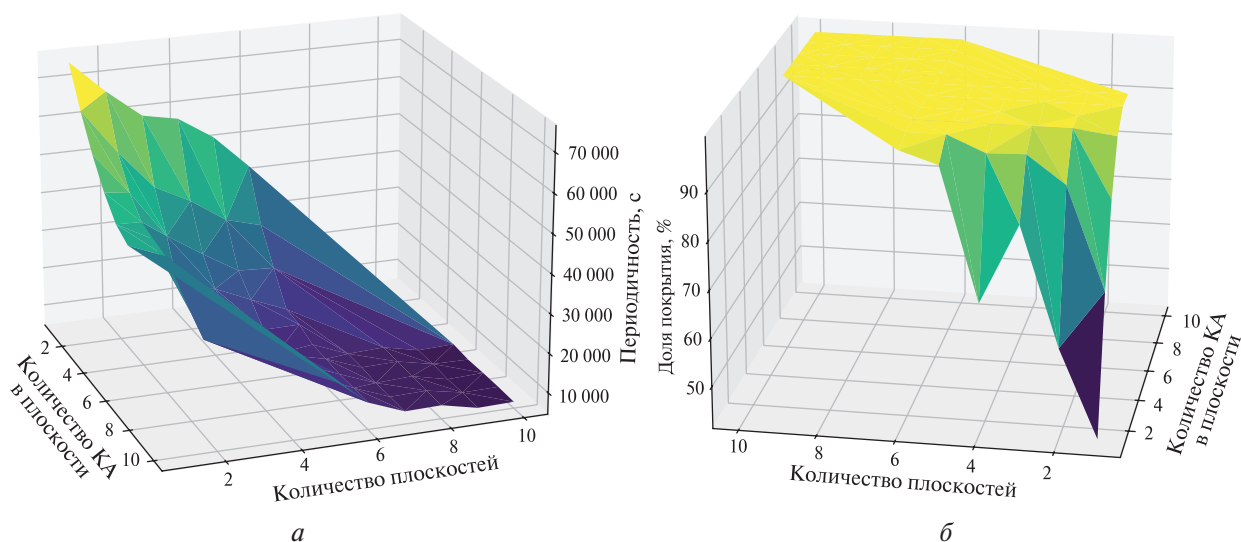


Рис. 4. Зависимость средней периодичности наблюдений от изменения количества плоскостей в составе КС и количества КА в каждой плоскости (*а*); зависимость доли (в %) покрытия Земли от изменения количества плоскостей в составе КС и количества КА в каждой плоскости (*б*)

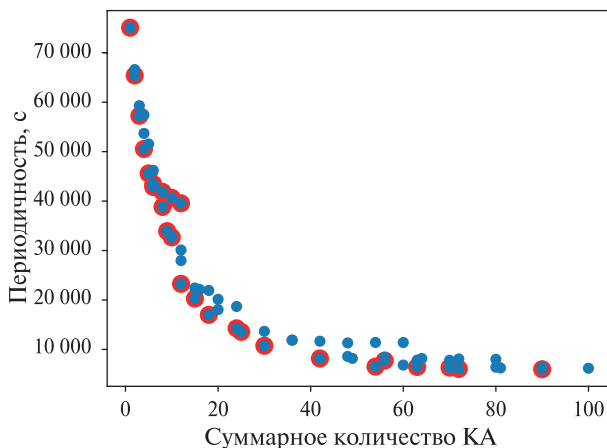


Рис. 5. Зависимость средней периодичности наблюдений от суммарного количества КА

Как можно заметить, на *рис. 5* оптимальными по Парето могут быть решения практически на всём диапазоне изменения периодичности и суммарного количества КА. Для того чтобы сузить количество вариантов, отбросим варианты с периодичностью больше чем 2,5 ч. В *табл. 3* приведены оптимальные по Парето решения для многоспутниковой системы. Каждый вариант обеспечивает практически глобальное покрытие поверхности Земли со средней периодичностью наблюдения лучше 2,5 ч.

Таким образом, в качестве исходных данных для моделирования были заданы: угол α поля зрения ОЭА, $2\alpha = 1,5^\circ$; угол γ отклонения по крену, $\gamma = \pm 30^\circ$; угол ϑ отклонения по тангажу, $\vartheta = \pm 10^\circ$. В *табл. 4* приведены достигнутые показатели покрытия при учёте освещённости поверхности Земли.

Таблица 3. Оптимальные по Парето решения для многоспутниковой системы

Номер варианта	Общее число КА	Число КА в одной плоскости	Число плоскостей	Средняя периодичность наблюдения, с	Суммарная площадь наблюдения, км ²	Доля покрытия поверхности Земли, %
1	42	6	7	8169,909	5,09E+08	99,85774
2	56	8	7	7739,583		
3	54	6	9	6533,095		
4	63	7		6453,104		
5	72	8		6056,415		
6	90	10	5988,998			
7	70	7	10	6318,017		

Таблица 4. Достигнутые показатели покрытия при учёте освещённости поверхности Земли

Вариант	№ 1	№ 2	№ 3
Обозначение в формате $i: N, P, F$	96: 42, 7, 0	96: 54, 9, 0	96: 72, 9, 0
Распределение плоскостей по долготе восходящего узла, град	51,4286	40	40
Распределение КА по углу истинной аномалии, град	60	60	45
Высота орбиты, км	350	350	350
Доля отснятой поверхности за сутки, %	94,5027	94,5027	94,5027
Время до максимального покрытия, ч	20	21	21

Примечание: i — наклонение; N — количество спутников в системе; P — количество плоскостей орбит (один из делителей числа N); F — коэффициент расфазировки спутников в соседних плоскостях, $F = 0, \dots, (P - 1)$.

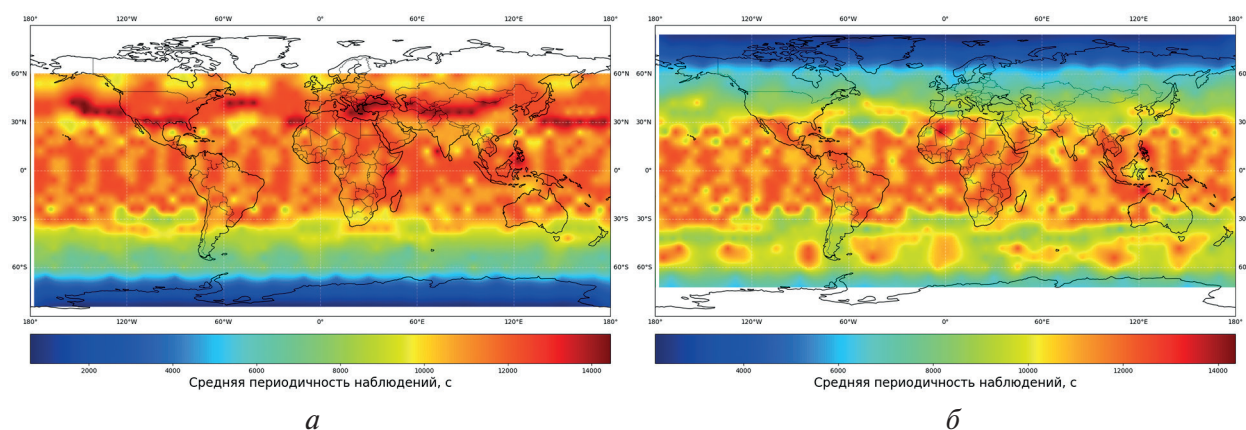


Рис. 6. Тепловая карта средней периодичности наблюдений для варианта № 1 осень (а) и весна (б)

Для иллюстрации результатов моделирования вариантов № 1, 3, 5 были построены тепловые карты распределения периодичности наблюдения заданной сетки объектов наблюдения (рис. 6–8, см. с. 90).

В связи с тем, что в зависимости от времени года условия освещённости могут существенно изменяться, тепловые карты были построены для суток полёта осенью и весной.

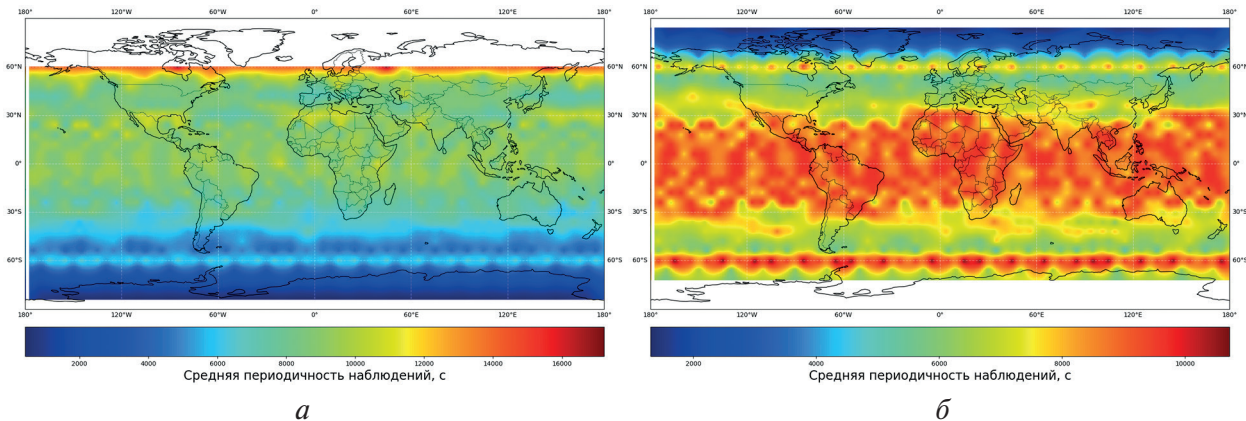


Рис. 7. Тепловая карта средней периодичности наблюдений для варианта № 2 осень (а) и весна (б)

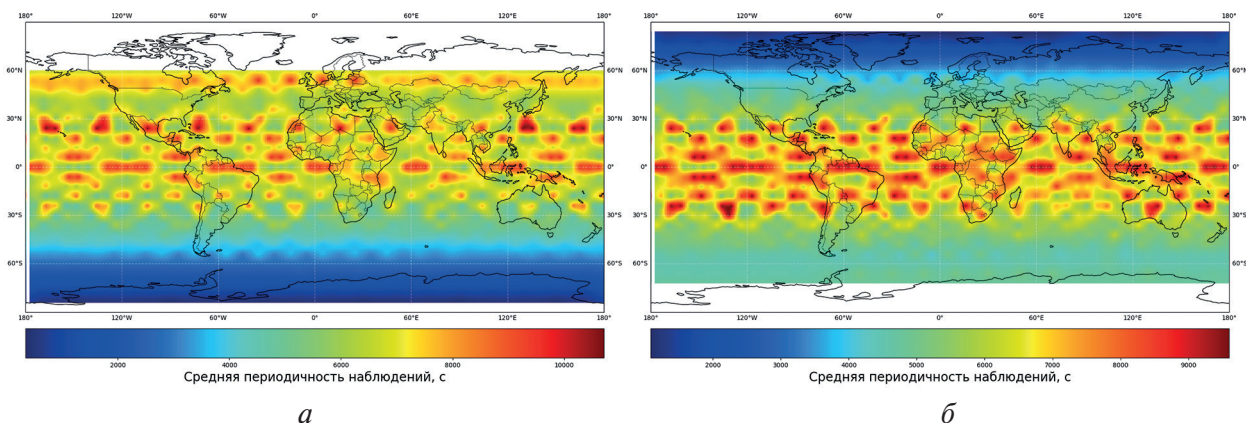


Рис. 8. Тепловая карта средней периодичности наблюдений для варианта № 3 осень (а) и весна (б)

Оценка оперативности доставки информации наблюдения на наземные пункты приёма от группировки сверхнизкоорбитальных космических аппаратов

Было проведено моделирование трёх рассмотренных выше вариантов построения КС (рис. 9).

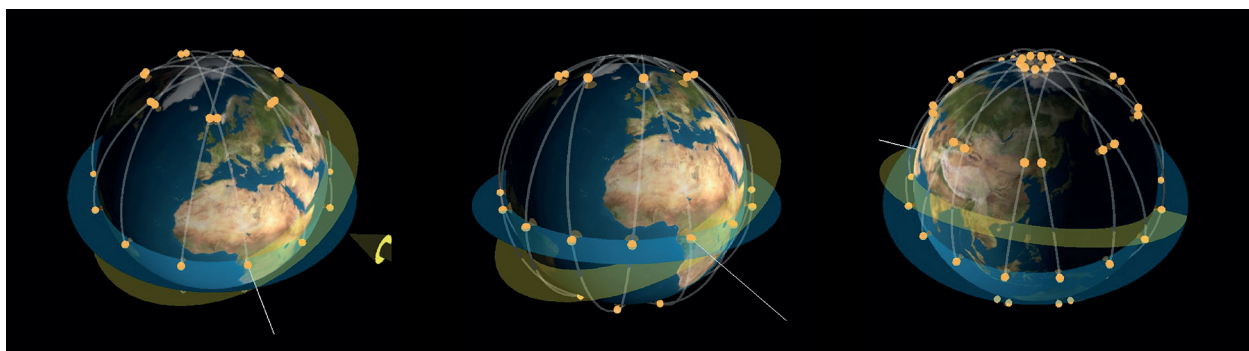


Рис. 9. Трёхмерное представление рассматриваемых вариантов

При моделировании предполагалось, что съёмка ведётся только на освещённой части витка, межспутниковые линии связи отсутствуют, накопленная информация передаётся на первую наземную станцию после съёмки, если выполняются ограничения, накладываемые техническими особенностями ОЭА и скоростью перенацеливания КА (Иванушкин, Ткаченко, 2023). На *рис. 10* приведены тепловые карты, характеризующие среднюю оперативность доставки отснятой информации на НППИ.

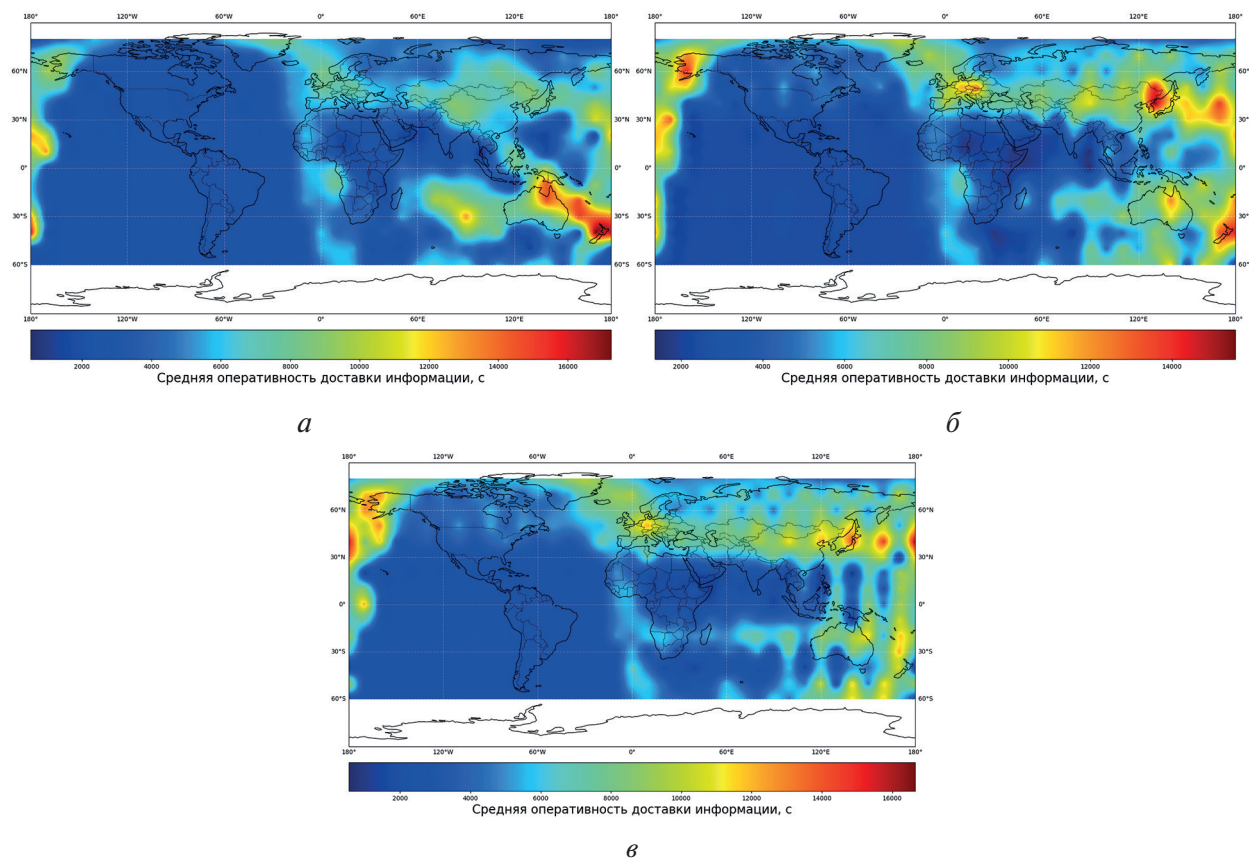


Рис. 10. Тепловая карта средней оперативности доставки информации на НППИ: *а* — вариант № 1; *б* — вариант № 2; *в* — вариант № 3

Таким образом, тепловые карты показывают, сколько потребуется времени для доставки данных о каждой наблюдаемой точке на НППИ. Оценивая среднюю оперативность доставки информации о локальных участках земной поверхности, можно определить наиболее предпочтительную орбитальную структуру в зависимости от зоны интереса.

Выбор характеристик бортового оборудования для временного хранения целевой информации и оборудования высокоскоростной радиолинии передачи целевой информации

Характеристики бортового БЗУ и СППИ должны обеспечивать хранение и передачу на НППИ всей накопленной целевой информации. Следовательно, должно выполняться следующее равенство:

$$V_{\text{ОЭА(сут)}} \leq V_{\text{СППИ(сут)}},$$

где $V_{\text{ОЭА(сут)}}$ — объём накопленной за сутки целевой информации; $V_{\text{СППИ(сут)}}$ — объём переданной на НППИ информации.

Объём накопленной за сутки целевой информации $V_{\text{ОЭА(сут)}}$ определяется как произведение информационного потока $I_{\text{ОЭА}}$ на суммарное время работы ОЭА в сутки ($\sum t_{\text{ОЭА}}$):

$$V_{\text{ОЭА(сут)}} = I_{\text{ОЭА}} \sum t_{\text{ОЭА}}.$$

В свою очередь объём переданной на НППИ информации $V_{\text{СППИ(сут)}}$ определяется как произведение скорости передачи информации ($I_{\text{СППИ}}$), которую гарантирует СППИ, на суммарное время доступа к НППИ ($\sum t_{\text{НППИ}}$):

$$V_{\text{СППИ(сут)}} = I_{\text{СППИ}} \sum t_{\text{НППИ}}.$$

Таким образом, приведённое выше неравенство будет выполняться, если объём информации, накапливаемой ОЭА за сутки, будет меньше или равен тому объёму информации, которое способно передать СППИ на НППИ за доступные сеансы связи. Для этого необходимо найти требуемую скорость передачи информации ($I_{\text{СППИ}}$):

$$I_{\text{СППИ}} = \frac{I_{\text{ОЭА}} n \cdot t_{\text{ОЭА}}}{N_{\text{НППИ}} n_{\text{сеанс}} t_{\text{НППИ}}^{\text{сред}}}.$$

где n — количество витков в сутки; $t_{\text{ОЭА}}$ — время съёмки на витке; $N_{\text{НППИ}}$ — количество НППИ, зоны радиовидимости которых не пересекаются; $n_{\text{сеанс}}$ — количество сеансов связи в сутки для i -го НППИ; $t_{\text{НППИ}}^{\text{сред}}$ — среднее время сеанса связи.

Варьированием значения времени работы ОЭА на одном витке были получены зависимости для объёма накопленной за сутки информации (рис. 11а) и потребной скорости передачи информации на НППИ (рис. 11б) при условии работы ОЭА на каждом витке орбиты.

Таким образом, на основе информации о современных высокоскоростных устройствах передачи информации по линии «космос — Земля», должно быть определено максимальное время работы ОЭА на одном витке (см. рис. 11а), затем из рис. 11б должен быть определён объём накопленной информации за сутки, исходя из которого предъявляются требования к БЗУ, способному хранить требуемый объём информации.

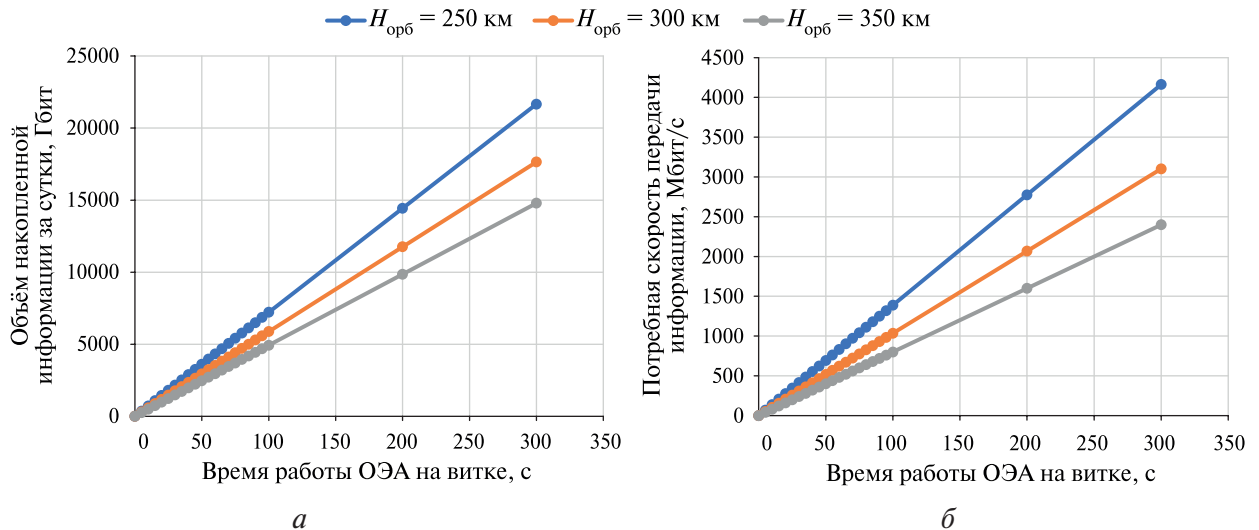


Рис. 11. Зависимость от времени работы ОЭА: а — объёма накопленной информации за сутки работы КА; б — потребной скорости передачи информации на НППИ

Заключение

Рассмотрены космические системы дистанционного зондирования Земли. Определён информационный поток, генерируемый космическими системами мониторинга Земли.

Выполнен анализ процесса формирования информационного потока оптико-электронной аппаратурой космических аппаратов. Проведена оценка информационного обмена между космическим аппаратом и наземным пунктом приёма информации. В результате получены зависимости, позволяющие определить требуемые характеристики бортового запоминающего устройства и передающей аппаратуры космического аппарата, а также сформулировать требования к наземным приёмным пунктам.

Описанные в настоящей статье научно-исследовательские результаты получены в рамках выполнения госзадания FSSS-2023-007 и гранта РНФ № 23-19-20025 (<https://rscf.ru/project/23-19-20025/>).

Литература

1. *Аджян А. П., Алифанов О. М., Андреев А. Н.* Ракетно-космическая техника. Машиностроение: Энциклопедия / гл. ред. Фролов К. В. М.: Машиностроение. 2004. Т. IV-12. 925 с.
2. *Волощев В. В.* Низкоорбитальные космические аппараты высокодетального наблюдения с длительным сроком существования на рабочих орбитах высотой ниже четырехсот километров // Инженер. журн.: Наука и инновации. 2021. № 12(120). Ст. 3. 17 с. DOI: 10.18698/2308-6033-2021-12-2135.
3. *Волощев В. В.* Цифровая модель силы сопротивления верхней атмосферы Земли для проектирования низкоорбитальных космических аппаратов // Вестн. Самарского ун-та. Аэрокосм. техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22. № 3. С. 13–24. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-13-24.
4. *Емельянов А. А., Малышев В. В., Нгуен В. Х. Н. и др.* Математическая модель функционирования наземного сегмента обработки данных ДЗЗ в части распределения процессов обработки // Научно-техн. вестн. Поволжья. 2018. № 2. С. 74–79. DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-74-79.
5. *Емельянов А. А., Малышев В. В., Старков А. В., Гришанцева Л. А., Зубкова К. И., Зай Яр Вин* (2019а) Результаты экспериментальной отработки математической модели распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем ДЗЗ // Научно-техн. вестн. Поволжья. 2019. № 8. С. 32–36.
6. *Емельянов А. А., Малышев В. В., Старков А. В., Гришанцева Л. А., Зубкова К. И., Зай Яр Вин* (2019б) Анализ и формирование показателей эффективности в задаче распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем ДЗЗ // Научно-техн. вестн. Поволжья. 2019. № 8. С. 28–31.
7. *Иванушкин М. А., Ткаченко И. С.* Оценка эффективности многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 4. С. 101–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-101-110.
8. *Карсаев О. В.* Имитационное моделирование автономного управления группировкой малых спутников // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2018. № 1(195). С. 140–154. DOI: 10.23683/2311-3103-2018-1-140-154.
9. *Карсаев О. В.* Анализ оперативности информационных взаимодействий в низкоорбитальных многоспутниковых группировках // Тр. СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 4. С. 858–886. DOI: 10.15622/sp.2019.18.4.858-886.
10. *Малышев В. В., Красильщиков М. Н., Бобронников В. Т., Нестеренко О. П., Федоров А. В.* Спутниковые системы мониторинга: Анализ, синтез и управление. М.: Изд-во МАИ. 2000. 568 с.
11. *Можайев Г. В.* Синтез орбитальных структур спутниковых систем: (Теоретико-групповой подход). М.: Машиностроение. 1989. 303 с.
12. *Потюпкин А. Ю., Данилин Н. С., Селиванов А. С.* Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов // Ракетно-косм. приборостроение и информац. системы. 2017. Т. 4. Вып. 4. С. 45–56. DOI: 10.17238/issn2409-0239.2017.4.45.
13. *Соллогуб А. В., Анишаков Г. П., Данилов В. В.* Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли. Математические модели повышения эффективности КА. М.: Машиностроение. 1993. 368 с.
14. *Ткаченко И. С., Сафронов С. Л., Иванушкин М. А., Кауров И. В.* Программа Russian Space System Developer (RSSD) для моделирования целевого функционирования и оценки эффективности многоспутниковых космических систем различного назначения. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023612104. Рег. 30.01.2023.
15. *Широбоков В. В., Шинкаренко А. Ф.* Подход к организации межспутникового взаимодействия в распределенной вычислительной структуре орбитальной группировки микроспутников // Тр. Военно-косм. акад. имени А. Ф. Можайского. 2015. № 646. С. 77–82.

16. Araniti G., Bezirgiannidis N., Birrane E. et al. Contact graph routing in DTN space networks: Overview, enhancements and performance // IEEE Communications Magazine. 2004. V. 53. No. 3. P. 38–46. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7060480.
17. Ekici E., Akyildiz I. F., Bender M. D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks // IEEE/ACM Trans. Networking. 2001. V. 9. No. 2. P. 137–147. DOI: 10.1109/90.917071.
18. Ivliev N., Evdokimova V., Podlipnov V. et al. First Earth-imaging CubeSat with harmonic diffractive lens // Remote Sensing. 2022. V. 14(9). Article 2230. 19 p. DOI: 10.3390/rs14092230.
19. Ivliev N., Podlipnov V., Petrov M. et al. 3U CubeSat-based hyperspectral remote sensing by offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements // Sensors. 2024. V. 24(9). Article 2885. P. 442–450. DOI: 10.3390/s24092885.
20. Walker J. G. Satellite constellations // J. British Interplanetary Society. 1984. V. 37. P. 559–571.

Assessing the design characteristics of low-orbit Earth remote sensing constellations

М. А. Ivanushkin^{1,2}, О. Д. Zhaldybina¹

¹ Samara National Research University, Samara 443086, Russia

² Image Processing Systems Institute — Samara, NRC “Kurchatov Institute”
Samara 443001, Russia
E-mail: ivanushkin.ma@ssau.ru

The paper considers Earth remote sensing space systems. The purpose of the paper is to evaluate the design characteristics of low-orbit constellations of Earth remote sensing spacecrafts. The process of information flow generation by spacecraft instruments of ultra-low-orbit spacecrafts is analyzed. The results of information flow calculations for three altitudes of operation of an ultra-low-orbiting small spacecraft operating at altitudes below 400 km equipped with multispectral and panchromatic photosensitive elements are described. The selection of orbital parameters of the constellation of ultra-low-orbiting spacecrafts providing quasi-continuous observation of the Earth’s surface is carried out. Pareto-optimal values of orbital altitude and inclination, providing maximum coverage of the Earth’s surface by one spacecraft at minimum observation periodicity, are obtained. The periodicity of observation of local regions of the Earth has been assessed, as well as the efficiency of information delivery by the constellation of ultra-low-orbiting spacecrafts. Pareto-optimal solutions for multi-satellite systems providing observation periodicity less than 2.5 hours for global observation are obtained. Dependencies describing the information exchange between a spacecraft and a ground receiving point were obtained. As a result, dependencies are obtained that allow determining the required characteristics of the onboard storage device and spacecraft transmitting equipment, as well as defining the requirements for ground receiving points of space information.

Keywords: information flow, Earth remote sensing instrument, space system, Earth remote sensing

Accepted: 26.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-85-96

References

1. Adjan A. P., Alifanov O. M., Andreev A. N., *Raketno-kosmicheskaya tekhnika Mashinostroenie. Enciklopediya* (Rocket and space technology. Mechanical Engineering. Encyclopedia), Frolov K. V. (ed.), Moscow: Mechanical engineering, 2004, Vol. IV-12, 925 p. (in Russian).
2. Volotsuev V. V., Low-orbit spacecraft for highly detailed observation with a long lifetime in working orbits with an altitude below four hundred kilometers, *Engineering J.: Science and Innovation*, 2021, No. 12(120), Article 3, 17 p. (in Russian), DOI: 10.18698/2308-6033-2021-12-2135.
3. Volotsuev V. V., Digital model of the drag force of the Earth’s upper atmosphere for the design of low-orbit spacecraft, *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2023, Vol. 22, No. 3, pp. 13–24 (in Russian), DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-13-24.

4. Emelianiv A. A., Malishev V. V., Nguen V. X. N. et al., Mathematical model of functioning of the ground segment of remote sensing data processing in terms of distribution of processing processes, *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2018, No. 2, pp. 74–79 (in Russian), DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-74-79.
5. Emelianiv A. A., Malishev V. V., Starkov A. V., Grishanceva L. A., Zubkova K. I., Zai Yar Vin (2019a), Results of experimental testing of the mathematical model for distribution of target information flows during operation of space remote sensing systems, *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2019, No. 8, pp. 32–36 (in Russian).
6. Emelianiv A. A., Malishev V. V., Starkov A. V., Grishanceva L. A., Zubkova K. I., Zai Yar Vin (2019b), Analysis and formation of performance indicators in the task of distribution of target information flows in the operation of space remote sensing systems, *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2019, No. 8, pp. 28–31 (in Russian).
7. Ivanushkin M. A., Tkachenko I. S., Efficiency assessment of multi-satellite Earth remote sensing space systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 4, pp. 101–110 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-101-110.
8. Karsaev O. V., Simulation of a small satellites group autonomous control, *Izvestiya SFEDU, Engineering Sciences*, 2018, No. 1(195), pp. 140–154 (in Russian), DOI: 10.23683/2311-3103-2018-1-140-154.
9. Karsaev O. V., Analysis of information interaction efficiency in low-orbit satellite constellations, *Proc. SPIIRAN*, 2019, Vol. 18, No. 4, pp. 858–886 (in Russian), DOI 10.15622/sp.2019.18.4.858-886.
10. Malishev V. V., Krasilshikov M. N., Bobronnikov V. T., Nesterenko O. P., Fedorov A. V., *Sputnikovye sistemy monitoringa: Analiz, sintez i upravlenie* (Satellite monitoring systems: Analysis, synthesis and control), Moscow: MAI Publ. House, 2000, 568 p. (in Russian).
11. Mozhaev G. V., *Sintez orbital'nyh struktur sputnikovyh sistem: Teoretiko-grupповoi podhod* (The synthesis of the orbital structures of satellite systems: group-theoretic approach), Moscow: Mashinostroenie, 1989, 303 p. (in Russian).
12. Potupkin A. U., Danilin N. S., Selivanov A. S., Small satellites clusters — a new type of space objects, *Rocket and space instrumentation and information systems*, 2017, Vol. 4, Issue 4, pp. 45–56 (in Russian), DOI: 10.17238/issn2409-0239.2017.4.45.
13. Sollogub A. V., Anshakov G. P., Danilov V. V., *Kosmicheskie apparaty sistem zondirovaniya poverhnosti Zemli: Matematicheskie modeli povysheniya effektivnosti KA* (Spacecraft of Earth surface sensing systems: Mathematical models for improving spacecraft efficiency), Moscow: Mechanical engineering, 1993, 368 p. (in Russian).
14. Tkachenko I. S., Safronov S. L., Ivanushkin M. A., Kaurov I. V., *Programma Russian Space System Developer (RSSD) dlya modelirovaniya tselevogo funktsionirovaniya i otsenki effektivnosti mnogosputnikovykh kosmicheskikh sistem razlichnogo naznacheniya* (Russian Space System Developer (RSSD) program for modeling of target operation and performance evaluation of multi-satellite space systems for various purposes), Certificate of state registration of software No. 2023612104 (RU), Reg. 30.01.2023 (in Russian).
15. Shirobokov V. V., Shinkarenko A. F., Approach to the organization of inter-satellite interaction in the distributed computing structure of the orbital constellation of microsatellites, *Proc. A. F. Mozhaisky Military Space Academy*, 2015, No. 646, pp. 77–82 (in Russian).
16. Araniti G., Bezirgiannidis N., Birrane E. et al., Contact graph routing in DTN space networks: Overview, enhancements and performance, *IEEE Communications Magazine*, 2004, Vol. 53, No. 3, pp. 38–46, DOI: 10.1109/MCOM.2015.7060480.
17. Ekici E., Akyildiz I. F., Bender M. D., A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks, *IEEE/ACM Trans. Networking*, 2001, Vol. 9, No. 2, pp. 137–147, DOI: 10.1109/90.917071.
18. Ivliev N., Evdokimova V., Podlipnov V. et al., First Earth-imaging CubeSat with harmonic diffractive lens, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14(9), Article 2230, 19 p., DOI: 10.3390/rs14092230.
19. Ivliev N., Podlipnov V., Petrov M. et al., 3U CubeSat-based hyperspectral remote sensing by offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements, *Sensors*, 2024, Vol. 24(9), Article 2885, pp. 442–450, DOI: 10.3390/s24092885.
20. Walker J. G., Satellite constellations, *J. British Interplanetary Society*, 1984, Vol. 37, pp 559–571.