

ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ICEYE»

М. В. Павлов✉, **М. П. Теремов**

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Целью данной работы является оценивание эффективности применения космической системы «ICEYE» при помощи разработанной программно-реализованной имитационной модели применения космических систем дистанционного зондирования Земли. В статье проведен анализ причин стремительного наращивания орбитальной группировки космической системы «ICEYE» на базе малых космических аппаратов, оснащенных радиолокатором с синтезированной апертурой, а также проанализирован её состав. Проведено оценивание эффективности функционирования космической системы дистанционного зондирования Земли на основе программно-реализованной имитационной модели. Исходными данными для моделирования являлись орбитальные параметры космических аппаратов «ICEYE» и соответствующие углы визирования для различных режимов съемки, а также координаты наземных пунктов приема информации. В результате моделирования были получены средние значения периодичности наблюдения участков земной поверхности и оперативности доведения радиолокационной информации до потребителей. Периодичность наблюдения участков земной поверхности представлена для различных режимов съемки в виде зависимости от геодезической широты. А оперативность доведения радиолокационной информации до потребителей при передаче информации через наземные пункты приема данных дистанционного зондирования Земли компании «Kongsberg Satellite Service» представлена в виде тепловой карты.

Ключевые слова: космический аппарат, радиолокатор с синтезированной апертурой, орбитальная группировка, космическая система, периодичность наблюдения, ICEYE.

Введение

Последние годы характеризуются возрастанием роли радиолокационных средств при решении разных прикладных задач, к числу которых относятся мониторинг состояния объектов промышленной и транспортной инфраструктуры, предупреждение и ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций, контроль важных подвижных транспортных объектов и наблюдение за опасными быстропротекающими природными явлениями. Это обусловлено высоким уровнем технических характеристик систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), обеспечивающих получение радиолокационных изображений (РЛИ) независимо от погодных условий и уровня освещенности с пространственным разрешением около 1 м и менее. Достижение подобного уровня характеристик, с одной стороны,

связано с применением активных фазированных антенных решеток и широкополосных сигналов, а с другой – с применением радиолокаторов, использующих принцип синтеза апертуры (РСА) [1].

Для обеспечения высокой периодичности наблюдения широко применяются многоспутниковые космические системы (КС) на базе малых космических аппаратов (МКА), к числу которых относится КС «ICEYE». Космическая система «ICEYE», созданная одноименной финской компанией, используется в целях обеспечения высокой периодичности радиолокационного наблюдения и оперативной доставки результатов радиолокационной съемки потребителям, как для нужд гражданских пользователей, так и в интересах военных ведомств.

Цель статьи: оценивание эффективности применения космической системы «ICEYE» при помощи разработанной программно-реализованной имитационной модели использования космических систем ДЗЗ.

✉ mvp2000@bk.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2024

1. Анализ развития и состава космической системы «ICEYE»

Компания «ICEYE» по состоянию на 27 февраля 2024 г. запустила 32 КА. К концу 2024 г. планируется запустить еще около 16 КА. Динамика изменения количества КА в КС «ICEYE» представлена на рисунке 1 [2].

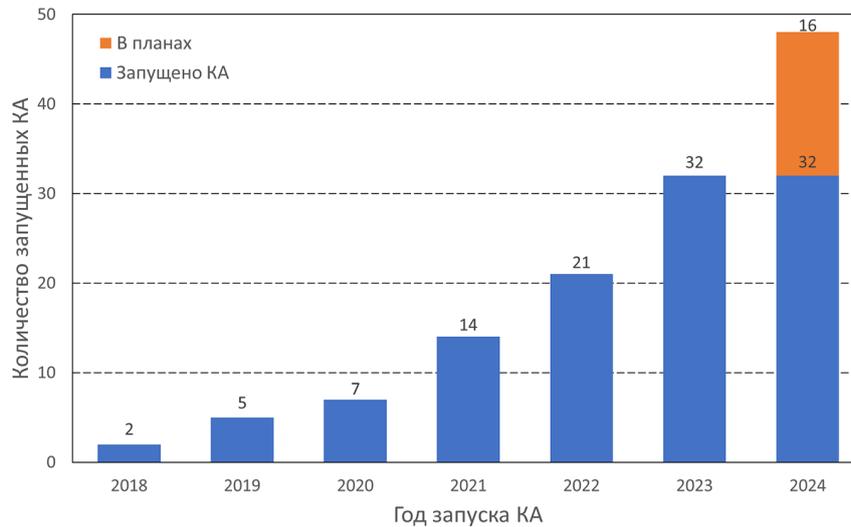


Рисунок 1. Динамика изменения количества КА в КС «ICEYE»

Такое стремительное наращивание орбитальной группировки «ICEYE» обусловлено использованием МКА, которые имеют преимущество по сравнению с крупноразмерными КА с финансовой точки зрения: средняя стоимость КА РСА массой 50–200 кг составляет 5–20 млн долл. США, в то время как средняя стоимость КА РСА массой 1–3 т составляет 300–500 млн долл. США [3]. Следующей особенностью является использование электронной компонентной базы (ЭКБ) без заданного уровня качества и надежности класса «Commercial» вместо высоконадежной ЭКБ класса «Space», «Military» или «MFR HiRel». Однако ценой этому стало значительное уменьшение срока активного существования КА.

С целью подтверждения возможности получения РЛИ высокого разрешения компания «ICEYE» в 2018 г. запустила КА-демонстратор «ICEYE X1». Данный КА, имеющий массу 70 кг, обладает пространственным разрешением до 10 м [4]. На текущий момент КА «ICEYE X1» прекратил свое активное существование.

В том же году был запущен КА «ICEYE X2», который является модификацией первой модели и обладает улучшенным пространственным разрешением до 3 м. Масса КА «ICEYE X2» составляет 80 кг [5].

В мае 2019 г. был запущен очередной КА «ICEYE X3» («Harbinger»), являющийся совмест-

ной разработкой компаний «ICEYE» и «York Space Systems». При этом полезная нагрузка была разработана компанией «ICEYE», платформа – «York Space Systems». Масса КА составляет 150 кг [6].

В июне 2019 г. был запущен КА «ICEYE X4», который является улучшенной версией КА «ICEYE X2», позволяющей получать РЛИ с про-

странственным разрешением до 1 м. Масса КА составляет 120 кг [7]. Именно на его основе разработаны последующие КА «ICEYE» второго поколения («X5» – «X22», «X24», «X27»).

Внешний вид КА РСА «ICEYE X1», «X2», «X3» («Harbinger»), «X4» представлен на рисунке 2.

Режимы съемки и их характеристики КА второго поколения приведены в таблице 1 [8, 9].

В январе 2023 г. состоялся запуск КА «ICEYE X22» с помощью ракеты-носителя «Falcon-9», в ходе которого возникла нештатная ситуация, заключающаяся в неразделении разгонного блока от ракета-носителя. Вследствие этого КА прекратил свое баллистическое существование [10].

В июне 2023 г. были запущены КА «ICEYE» третьего поколения, а именно «ICEYE X23», «X25», «X26» и «X30». Заявлено, что третье поколение КА «ICEYE» обладает режимом «Spot Fine», который обеспечивает пространственное разрешение до 0,5 м, а также режимом «Dwell mode», предназначенным для обнаружения изменений на земной поверхности практически в режиме реального времени [7, 11].

В ноябре 2023 г. состоялся запуск еще четырех КА «ICEYE» третьего поколения, а именно «ICEYE X31», «X32», «X34» и «X35» [7, 12].

Все КА «ICEYE» размещены на солнечно-синхронных орбитах в диапазоне высот

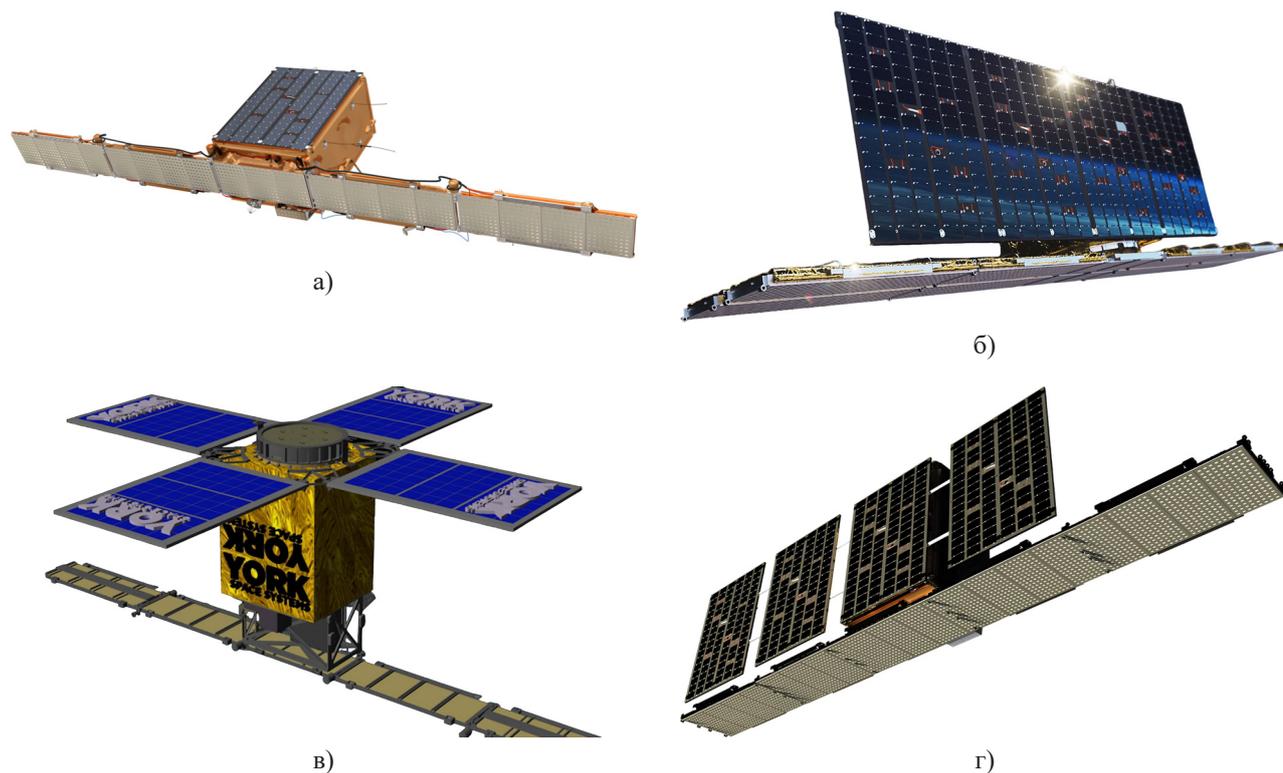


Рисунок 2. Внешний вид КА РСА типа «ICEYE»: а – «ICEYE X1»; б – «ICEYE X2»; в – «ICEYE X3» («Harbinger»); г – «ICEYE X4»

Таблица 1
 Параметры режимов съемки КА «ICEYE» второго поколения

Параметр	Режим съемки			
	Телескопический	Скольльзящий	Маршрутный	Обзорный
Размер кадра, км	5 x 5	15 x 15	–	–
Размер полосы захвата, км	–	–	30	100
Углы визирования, °	20–35	20–35	15–30	21–29
Разрешение по горизонтальной дальности, м	1	1	3	15
Разрешение по азимуту, м	1	1	3	15

425...570 км и с наклоном 97,3°...97,9°, за исключением «ICEYE X3» («Harbinger»), наклонение орбиты которого 40,0°.

Высокие значения пространственного разрешения бортовой специальной аппаратуры КА «ICEYE» привели к возникновению значительного спроса на РЛИ. В рамках данной деятельности ряд стран приняли решение о приобретении КА «ICEYE» в национальных интересах.

Так, запуск КА «ICEYE X3» («Harbinger») был спонсирован Командованием космической и противоракетной обороны армии США в рамках программы «Space Text Program» [13]. Оператором системы является американская компания «York Space Systems» [6].

Космические аппараты «ICEYE X10» («XR 1»), «X17», «X24», а также еще два неназванных КА

третьего поколения произведены коммерческой организацией «ICEYE US» (американский филиал компании «ICEYE», расположенный в г. Ирвин, шт. Калифорния) [7, 11].

Также компания «ICEYE» заключила контракт о продаже КА «ICEYE X18» («Carcará 1») и «X19» («Carcará 2») министерству обороны Бразилии. Стоимость контракта составила около 30 млн евро [7, 14].

Таким образом, компания «ICEYE» произвела 32 КА, из которых 2 прекратили свое активное существование и 8 были переданы другим операторам. В рамках данной статьи оценивание эффективности функционирования КС «ICEYE» будет осуществляться для оставшихся 22 КА. Визуальное представление орбитальной группировки КА «ICEYE» показано на рисунке 3.

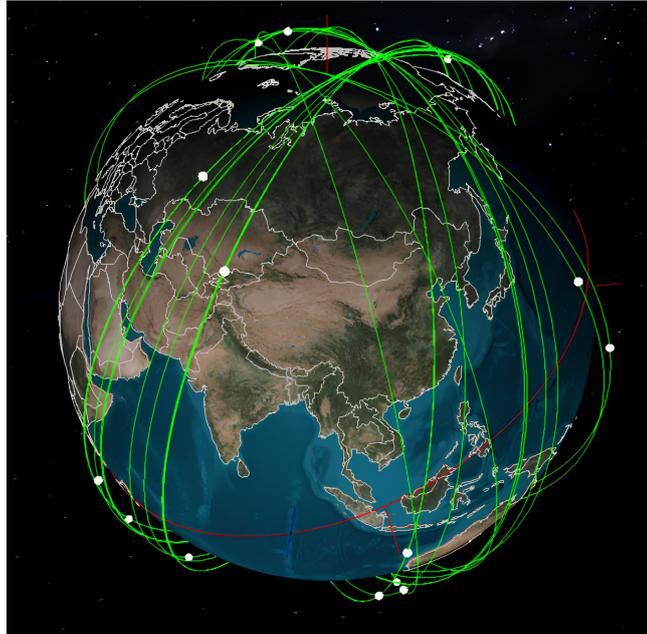


Рисунок 3. Визуальное представление орбитальной группировки КА «ICEYE»

2. Оценка эффективности функционирования КС «ICEYE» с использованием аналитико-имитационного моделирования

Для оценивания эффективности использования КС «ICEYE» была разработана программно-имитационная модель ее применения. Исходными данными являлись орбитальные параметры КА «ICEYE» и углы визирования КА для различных режимов. В результате моделирования были получены данные по периодичности наблюдения участков земной поверхности и оперативности доставки информации до потребителя.

Зависимости средней периодичности наблюдения КС «ICEYE» участков земной поверхности от геодезической широты для различных режимов представлены на рисунке 4.

Зависимости на рисунке 4 показывают, что на экваторе периодичность наблюдения максимальна, а на приполярных широтах – минимальна. Разброс значений у полюсов обусловлен колебаниями выборки.

Для телескопического, скользящего и маршрутного режимов средняя периодичность наблюдения участков земной поверхности не превышает 5 часов, а для обзорного режима – 8,5 часов.

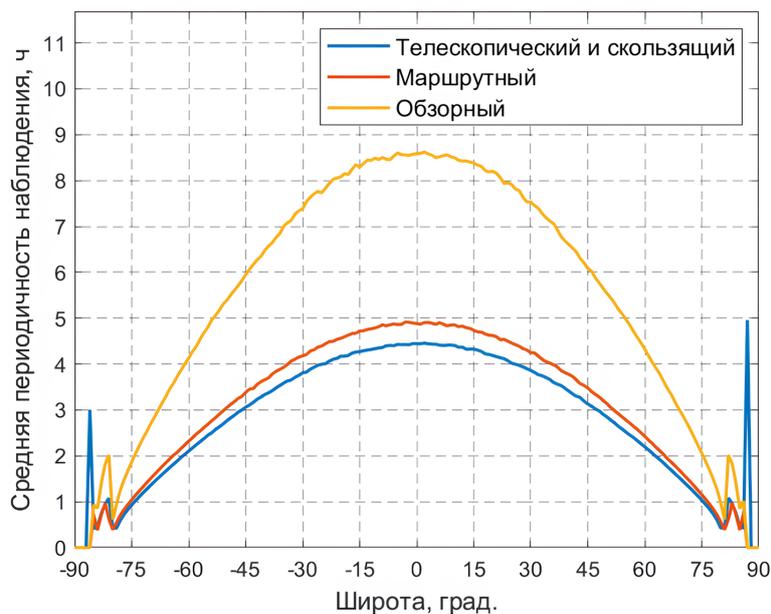


Рисунок 4. Зависимости средней периодичности наблюдения КС «ICEYE» от широты для различных режимов

Еще одной важнейшей характеристикой, позволяющей оценить эффективность применения КС, является оперативность доставки информации до потребителя.

Заявленные высокие показатели оперативности – полученное РЛИ может быть обработано и передано заказчику за 15 минут – достигаются за счет сотрудничества компаний «ICEYE» и «Kongsberg Satellite Services» («KSAT») [15].

Норвежская компания «KSAT» предоставляет компании «ICEYE» пункты приема информации (ППИ) для приема данных ДЗЗ. ППИ «KSAT» расположены по всему миру: в общей сложности насчитывается более 270 антенн в 26 пунктах приема [16].

Данные ДЗЗ, полученные радиолокатором, сжимаются, зашифровываются и передаются со скоростью 500 Мбит/с в диапазоне частот 8025–8400 МГц на ППИ. Передача телеметрической и командной информации между КА и центром управления полетами осуществляется в S-диапазоне на частотах 2200–2290 МГц и 2025–2110 МГц соответственно [17].

Будем оценивать потенциально достижимую оперативность доставки информации при использовании всех станций «KSAT». Исходными данными для моделирования являлись:

- орбитальные параметры КА «ICEYE»;
- углы визирования КА для телескопического и скользящего режимов;
- координаты ППИ «KSAT».

Результатом моделирования стала тепловая карта распределения значений средней оперативности доведения радиолокационной информации до потребителей при осуществлении передачи данных через наземные пункты приема, представленная на рисунке 5. Красными точками обозначены ППИ «KSAT».

При расчетах оперативности не учитывается промежуток времени от момента формирования заявки до съемки участков земной поверхности. Учитывается только время, затраченное на передачу полученного РЛИ на ППИ «KSAT».

На рисунке 5 белые зоны на тепловой карте означают, что КА не осуществляют съемку на данной широте.

Если усреднить значения оперативности по всей поверхности Земли, то оперативность доставки информации до потребителя составляет в среднем 6 минут.

Тепловая карта позволяет сделать следующие выводы: вследствие географии распределения ППИ при съемке участков земной поверхности Европы доставка данных ДЗЗ на ППИ осуществляется без задержки, а при съемке Азии оперативность доставки информации в среднем равна 5 минутам. При этом наихудшая оперативность доставки осуществляется в Тихом океане – в среднем 30 минут.

Для дальнейшего повышения оперативности доставки информации компания «ICEYE» планирует дополнительно использовать сеть ретрансля-

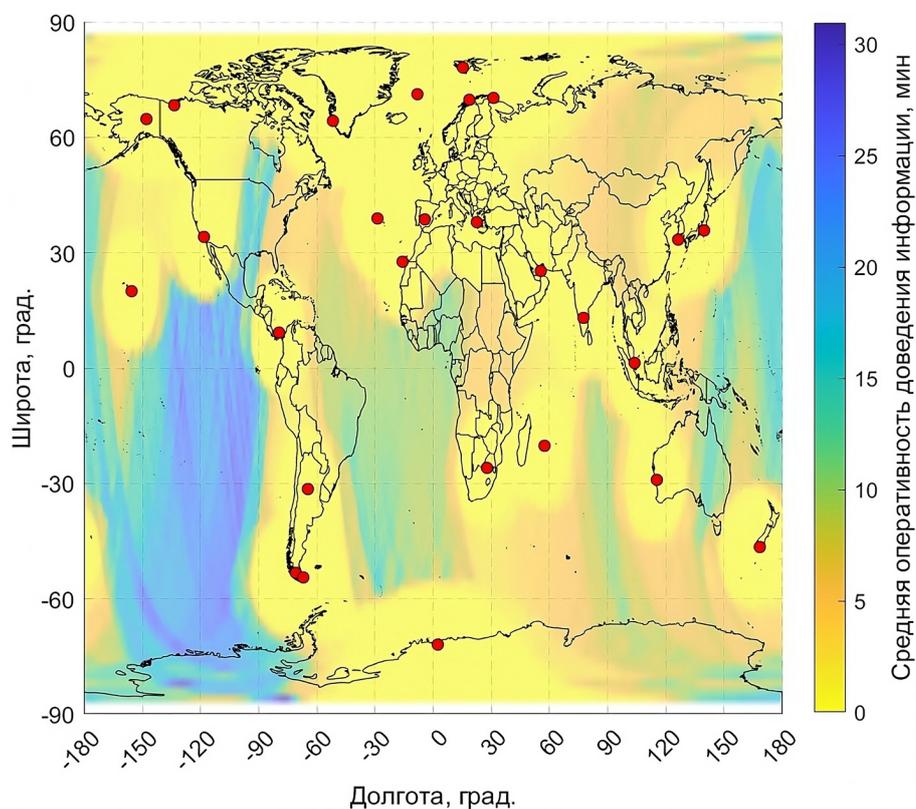


Рисунок 5. Тепловая карта распределения средней оперативности доведения информации при передаче данных через наземные ППИ

ции компании «Audacy», которая состоит из трех КА-ретрансляторов и трех ППИ в Сан-Франциско (США), Сингапуре и Европе [18, 19].

Заключение

Разработанная программная модель оценивания эффективности применения космической системы «ICEYE» позволила рассчитать зависимость средней периодичности наблюдения участков земной поверхности от геодезической широты для различных режимов, а также оперативность

доставки специальной информации до потребителя. Периодичность в среднем не превосходит 5 часов для телескопического, скользящего и маршрутного режимов, и 8,5 часов для обзорного режима. А оперативность в среднем составляет 6 минут (при использовании всех станций «KSAT»). Полученные значения свидетельствуют о том, что орбитальные группировки малых космических аппаратов с радиолокаторами с синтезированной апертурой являются эффективным средством высокопериодичного наблюдения, вне зависимости от погодных условий и времени суток.

Список литературы

- [1] Кадуков Е. П. Распознавание объектов контроля на радиолокационных изображениях с использованием метода опорных векторов // Вопросы оборонной техники. Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. 2022. № 171–172. DOI: 10.53816/23061456_2022_9–10_96.
- [2] Брошюра о миссиях «ICEYE» [Электронный ресурс]. URL: https://www.iceye.com/hubfs/_DATA_AND_MISSIONS/Missions_Brochure_ICEYE.pdf (дата обращения 21.02.2024).
- [3] Тушавина О. В., Кучейко А. А., Костюк Е. А., Зайцев С. Э. Состояние и перспективы развития орбитальных группировок малогабаритных космических аппаратов с PCA зарубежных коммерческих операторов // Дистанционное зондирование Земли из космоса. 2021. Ч. 1. Выпуск № 18 (77). С. 74–78.
- [4] Космический аппарат «ICEYE X1» [Электронный ресурс]. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/iceye-x1.htm (дата обращения: 21.02.2024).
- [5] Космический аппарат «ICEYE X2» [Электронный ресурс]. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/iceye-x2.htm (дата обращения: 21.02.2024).
- [6] Космический аппарат «ICEYE X3» («Harbinger») [Электронный ресурс]. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/harbinger.htm (дата обращения: 21.02.2024).
- [7] Космические аппараты «ICEYE X4», ..., «X35» [Электронный ресурс]. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/iceye-x4.htm (дата обращения: 21.02.2024).
- [8] Брошюра о данных «ICEYE» [Электронный ресурс]. URL: https://www.iceye.com/hubfs/Downloadables/SAR_Data_Brochure_ICEYE.pdf (дата обращения: 21.02.2024).
- [9] Характеристики изображений PCA [Электронный ресурс]. URL: <https://sar.iceye.com/5.1.2/productguide/collectioncharacteristics/> (дата обращения: 21.02.2024).
- [10] Запуски и орбитальные операции [Электронный ресурс]. URL: <http://orbitalfocus.uk/Diaries/Launches/Launches.php?year=2023> (дата обращения: 21.02.2024).
- [11] Четыре новых спутника «ICEYE» 3-го поколения [Электронный ресурс]. URL: <https://sar.iceye.com/5.0/productguide/ordering/> (дата обращения: 21.02.2024).
- [12] «ICEYE» расширяет свою ведущую в мире группировку радиолокационных спутников благодаря запуску четырех новых спутников [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iceye.com/press/press-releases/iceye-elevates-its-world-leading-radar-imaging-constellation-with-four-new-satellites-launched/> (дата обращения: 21.02.2024).
- [13] Занин К. А., Клименко Н. Н. Возможности космических систем радиолокационного наблюдения по периодичности наблюдения объектов и районов // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 4. С. 82–93.
- [14] Продажа финского микроспутника Бразилии вызывает критику [Электронный ресурс]. URL: <https://yle.fi/a/3-11733127/> (дата обращения: 27.02.2024).
- [15] «KSAT» и «ICEYE» расширяют партнерство [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iceye.com/press/press-releases/ksat-and-iceye-extend-partnership-with-more-radar-satellite-imagery-and-faster-data-analysis> (дата обращения: 27.02.2024).
- [16] Пункты приема информации «KSAT» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ksat.no/> (дата обращения: 27.02.2024).
- [17] Заявка на получение разрешения на запуск и эксплуатацию негеостационарной спутниковой системы в спутниковой службе исследования Земли [Электронный ресурс]. URL: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20210212-00021/3872377.pdf> (дата обращения: 27.02.2024).
- [18] «ICEYE» подписала соглашение о межспутниковой ретрансляции данных с «Audacy» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spaceitbridge.com/iceye-signs-inter-satellitecomm-deal-with-audacy.htm> (дата обращения: 27.02.2024).
- [19] Коммерческая межспутниковая сеть ретрансляции данных «Audacy» [Электронный ресурс]. URL: <https://spaceflight.com/sp-customers/audacy/> (дата обращения: 27.02.2024).

EVALUATION OF «ICEYE» SPACE SYSTEM APPLICATION EFFICIENCY

M. V. Pavlov, M. P. Teremov

*Military (Research Institute) Institute Mozhaisky Military Space Academy
St. Petersburg, The Russian Federation*

The purpose of this paper is to evaluate the application efficiency of the “ICEYE” space system using the developed software-implemented simulation model of Earth remote sensing space systems application. The article analyzes the reasons for the rapid expansion of the orbital constellation of the ICEYE space system based on small spacecraft equipped with synthetic aperture radar and its composition. The application efficiency of the Earth remote sensing space system was evaluated on the basis of a software-implemented simulation model. The initial data for modeling were the orbital parameters of the ICEYE spacecrafts and the corresponding angles of view for different imaging modes, as well as the coordinates of ground receiving stations. As a result of modeling, average values of periodicity of observation of the Earth surface areas and efficiency of radar information delivery to consumers were obtained. Frequency of observation of the Earth surface areas is presented for different imaging modes as a function of geodetic latitude. And the efficiency of radar information delivery to consumers when transmitting information via ground receiving stations of remote sensing data of «Kongsberg Satellite Service» company is presented in the form of a heat map.

Keywords: spacecraft, synthetic aperture radar, orbital constellation, space system, periodicity of observation, ICEYE.

References

- [1] Kadukov E. P. Recognition of control objects in radar images using the support vector method // Issues of defense technology. Technical means of countering terrorism. 2022. Part 16. No. 171–172. doi: 10.53816/23061456_2022_9–10_96.
- [2] Missions brochure. Available at: https://www.iceye.com/hubfs/_DATA_AND_MISSIONS/Missions_Brochure_ICEYE.pdf (accessed 21.02.2024).
- [3] Tushavina O. V., Kucheiko A. A., Kostyuk E. A., Zaitsev S. E. State and prospects of development of orbital constellations of small-size spacecraft with RSA of foreign commercial operators // Remote Sensing of the Earth from Space. 2021. Part 1. No. 18 (77), pp. 74–78.
- [4] ICEYE X1. Available at: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/iceye-x1.htm (accessed 21.02.2024).
- [5] ICEYE X2. Available at: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/iceye-x2.htm (accessed 21.02.2024).
- [6] ICEYE X3 (Harbinger). Available at: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/harbinger.htm (accessed 21.02.2024).
- [7] ICEYE X4. Available at: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/iceye-x4.htm (accessed 21.02.2024).
- [8] Data brochure. Available at: https://www.iceye.com/hubfs/Downloadables/SAR_Data_Brochure_ICEYE.pdf (accessed 21.02.2024).
- [9] SAR Imagery Product. Available at: <https://sar.iceye.com/5.1.2/productguide/collectioncharacteristics/> (accessed 21.02.2024).
- [10] Launches and Orbital Operations. Available at: <http://orbitalfocus.uk/Diaries/Launches/Launches.php?year=2023> (accessed 21.02.2024).
- [11] ICEYE's Four New Generation 3 Satellite. Available at: <https://sar.iceye.com/5.0/productguide/ordering/> (accessed 21.02.2024).
- [12] ICEYE Elevates Its World Leading Radar Imaging Constellation With Four New Satellites Launched Available at: <https://www.iceye.com/press/press-releases/iceye-elevates-its-world-leading-radar-imaging-constellation-with-four-new-satellites-launched/> (accessed 21.02.2024).
- [13] Zanin K. A., Klimenko N. N. Opportunities of the space radar observation systems on the periodicity of objects and areas observation // Air and Space. 2020. No. 4, pp. 82–93.
- [14] Sale of Finnish microsatellite to Brazil raises criticism. Available at: <https://yle.fi/a/3–11733127/> (accessed 27.02.2024).
- [15] KSAT and ICEYE Extend Partnership with More Radar Satellite Imagery and Faster Data Analysis. Available at: <https://www.iceye.com/press/press-releases/ksat-and-iceye-extend-partnership-with-more-radar-satellite-imagery-and-faster-data-analysis> (accessed 27.02.2024).

- [16] Ground Network Services. Available at: <https://www.ksat.no/> (accessed 27.02.2024).
- [17] Application for Authority to Launch And Operate a Non-Geostationary Satellite System in the Earth-Exploration Satellite Service. Available at <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20210212-00021/3872377.pdf> (accessed 27.02.2024).
- [18] ICEYE signs inter-satellite comm deal with Audacy. Available at <https://www.spaceitbridge.com/iceye-signs-inter-satellitecomm-deal-with-audacy.htm> (accessed 27.02.2024).
- [19] Audacy Internet-Style Network for Commercial Satellites. Available at: <https://spaceflight.com/sp-customers/audacy/> (accessed 27.02.2024).

Сведения об авторах

Павлов Михаил Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Окончил БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в 2022 году. Область научных интересов: космические аппараты.

Теремов Михаил Петрович – начальник 3 управления военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Окончил Высшее военное инженерное училище радиоэлектроники (г. Череповец) в 1998 году. Область научных интересов: космические аппараты.