

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ STARLINK

© 2025 г. И.А. Шеремет^{а,*}, С.А. Матвеев^{**}

^аГеофизический центр РАН, Москва, Россия

*E-mail: sheremet@rfbr.ru

**E-mail: smatveyev@rambler.ru

Поступила в редакцию 19.03.2025 г.

После доработки 31.03.2025 г.

Принята к публикации 02.04.2025 г.

Представлены обобщённые статистические данные о запусках и выводе из эксплуатации космических аппаратов (КА) спутниковой системы Starlink и оценки реального срока их активного существования. Приведены результаты расчётов достижимого состава орбитальной группировки с учётом и без учёта досрочного вывода КА из эксплуатации. Рассмотрены возможности дальнейшего наращивания орбитальной группировки Starlink.

Ключевые слова: Starlink, спутниковая система, космический аппарат, орбитальная группировка, срок активного существования.

DOI: 10.31857/S0869587325050039, EDN: ЕКННХА

С развитием технологий глобальной связи и мониторинга Земли низкоорбитальные многоспутниковые группировки [1–4] будут играть всё более важную роль в решении военных и социально-экономических задач. В настоящее время известен целый ряд проектов (Starlink¹, Starshield, OneWeb, Kuiper, Qianfan, Lynk Global, Hawkeye, “Сфера”, “Рассвет”) [5–7], которые находятся в разной степени готовности – от отработки базовых технологий до развертывания и эксплуатации орбитальной группировки и объектов наземной инфраструктуры.



ШЕРЕМЕТ Игорь Анатольевич – академик РАН, главный научный сотрудник ГЦ РАН. МАТВЕЕВ Сергей Алексеевич – независимый эксперт.

Так называемая “теорема существования” таких систем доказана компанией SpaceX в рамках развертывания и эксплуатации спутниковой системы (СПС) высокоскоростного доступа в Интернет Starlink в составе орбитальной группировки (ОГ) на базе малых космических аппаратов, центра управления сетью, шлюзовых станций, абонентских терминалов, а также центра управления миссией для управления КА и оценки их работоспособности [8–10].

Прогноз функционирования многоспутниковых группировок из тысяч и десятков тысяч космических аппаратов (КА) на низких орбитах представляет собой нетривиальную задачу. С одной стороны, необходимо иметь в виду физическое старение КА, темпы которого определяются сроком их активного существования (САС). С другой – моральное старение космических систем может происходить ещё быстрее, причём неочевидно, что поддержание ком-

¹ Starlink (от англ. *star* – звезда и *link* – соединение, связь) – планетарная система искусственных спутников, разворачиваемая компанией SpaceX для обеспечения доступа к высокоскоростному широкополосному спутниковому Интернету в местах, где он был ненадёжным, дорогим или полностью недоступным (в перспективе выход в сеть будет возможен из любой точки на поверхности земного шара).

мерческой привлекательности многоспутниковых группировок в течение десятков лет удастся обеспечить путём эволюционной модернизации без замены всей системы на что-то принципиально новое. Кроме того, не исключены различного рода форс-мажорные обстоятельства, которые не позволят поддерживать функционирование спутниковых систем в течение длительного времени. В связи с этим для каждой из создаваемых многоспутниковых систем актуальна оценка достижимого количества одновременно работающих КА в орбитальной группировке с учётом динамики их запусков и вывода из эксплуатации.

Рассмотрим основные результаты подобного прогнозирования применительно к спутниковой системе Starlink. Все приводимые далее обобщённые данные о ней, представленные в виде таблиц, диаграмм и графиков, получены авторами на основе анализа открытых данных.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ STARLINK

Перечислим основные достоинства СпС Starlink:

- глобальное покрытие, возможность использовать систему в труднодоступных местах, в районах с неразвитой или разрушенной телекоммуникационной инфраструктурой;
- высокая скорость передачи информации;
- простота установки абонентских терминалов, для которой не требуется специальных знаний и привлечения специалистов SpaceX;
- разнообразие применений (для государственных структур, домашних пользователей, бизнеса, сельского хозяйства, транспорта и др.);
- высокая живучесть (выход из строя целых групп КА не приводит к разрушению системы в целом);
- возможность дальнейшего развертывания и поддержания состава орбитальной группировки за счёт уникальных технологий серийного производства, которые позволяют изготавливать сравнительно недорогие КА в короткие сроки;
- постоянное развитие услуг, предоставляемых пользователям благодаря совершенствованию абонентской аппаратуры, освоению новых диапазонов частот, совершенствованию приёмо-передающих трактов, внедрению новых технологий (например, технологии Digest-to-Cell (D2C), обеспечивающей прямую связь сотовых телефонов с КА), использованию аппаратуры межспутниковой лазерной связи;
- масштабируемость технологических решений и возможность создания на основе Starlink спутниковых систем различного назначения, ориентированных на рынок B2G (Business-to-Government) (пример – спутниковая система во-

енного назначения Starshield, активная фаза развертывания которой началась в 2024 г.).

Наиболее характерные отличия СпС Starlink от других аналогичных систем сводятся к следующему:

- на околоземную орбиту в период 2018–2024 гг. выведено огромное (7632) количество КА (для сравнения: в составе СпС OneWeb – 657 КА);
- достигнутый годовой уровень количества КА, выводимых на околоземную орбиту, составляет порядка 2 тыс. в год, что обеспечило в 2024 г. запуск более 85% всех выведенных в этом году КА США, что более чем в 4.5 раза превысило суммарное количество КА, выведенных Китаем, Россией, Великобританией, Францией и Японией вместе взятыми;
- развертывание орбитальной группировки происходит поэтапно с наращиванием количества КА различных модификаций от года к году; запуск КА ранних версий прекращён (v1.0 в 2021 г., v1.5 в 2023 г.), начиная с 2024 г. производится запуск только КА v2.0 mini и v2.0 mini D2C; запланирована дальнейшая модернизация КА Starlink, в том числе выпуск КА v2.0 mini с уменьшенной массой;
- версии КА v0, v0.9, v1.0, v1.5, v2.0 mini (v2.0 mini D2C) отличаются по тактико-техническим характеристикам, в том числе по массе;
- вывод на орбиту всех КА в 2018–2024 гг. производился с использованием серийной ракеты-носителя Falcon 9², которая позволяет выводить 50–57 КА ранних версий и 20–27 КА v2.0 mini за один запуск.

Остановимся на основных характеристиках орбитальной группировки Starlink в период 2018–2024 гг. (Информационные материалы, приведённые в статье, – это результат обработки данных [1] и их сопоставления с [5–9, 11–13].) Динамика запусков по годам с учётом версий КА представлена в таблице 1 и на рисунке 1.

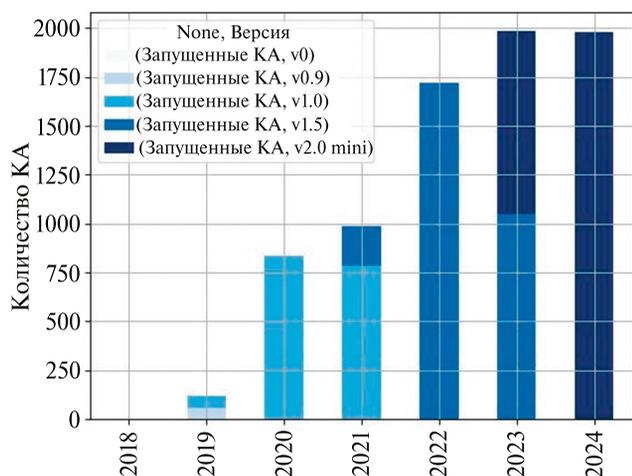
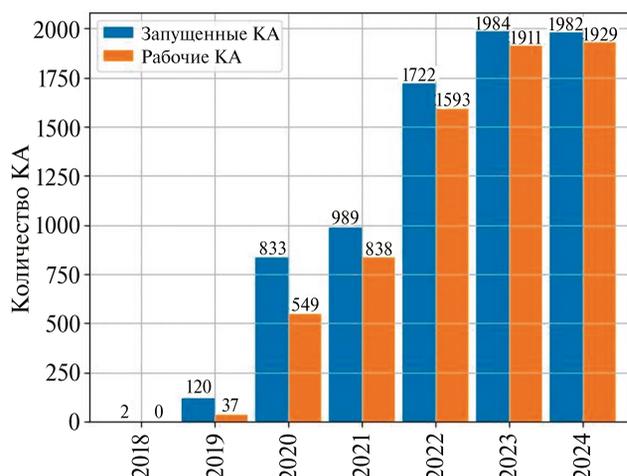
В период 2018–2024 гг. часть космических аппаратов по разным причинам выведена из эксплуатации или не введена в эксплуатацию, а общее количество работающих КА составляет примерно 89% от совокупности запущенных (табл. 2, рис. 2).

Досрочный вывод из эксплуатации КА Starlink (так называемая “детская смертность”) регистрируется начиная с первого года и увеличивается после третьего года эксплуатации. Часть КА версии v1.0 функционирует за пределами срока активного существования, КА версий v1.5, v2.0 mini – менее 5 лет, причём статистические данные об их реальном САС отсутствуют. Зависимость реального срока вывода из эксплуатации КА от времени в днях показана на рисунке 3. На рисунке 4 представлены статистические оценки отношения количества функционирующих и запущенных КА с 2018 по 2024 г.

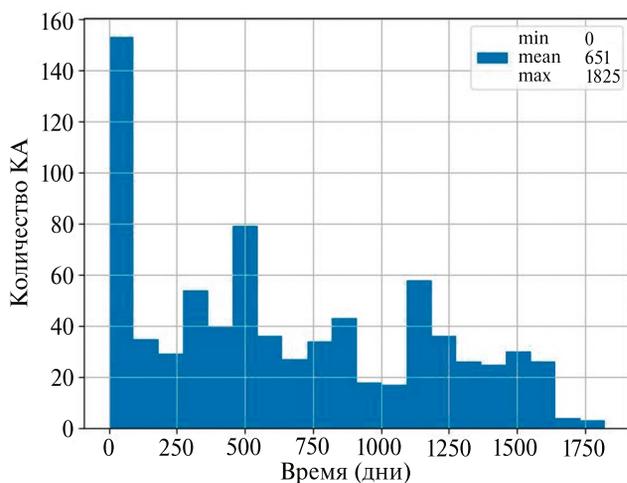
² Falcon 9 (от англ. “сокол”) – семейство ракет-носителей тяжёлого класса с многоразовой первой ступенью серии Falcon американской компании SpaceX.

Таблица 1. Динамика запуска Starlink различных версий космических аппаратов, 2018–2024 гг.

Версия	Запущенные КА						Всего	Запуски КА
	v0	v0.9	v1.0	v1.5	v2.0 mini	v2.0 mini D2C		
Год						0		
2018	2	0	0	0	0	0	2	1
2019	0	60	60	0	0	0	120	2
2020	0	0	833	0	0	0	833	14
2021	0	0	785	204	0	0	989	19
2022	0	0	0	1722	0	0	1722	34
2023	0	0	0	1048	936	0	1984	63
2024	0	0	0	0	1593	389	1982	90
Всего	2	60	1678	2974	2529	389	7632	223

**Рис. 1.** Количество запущенных Starlink космических аппаратов, 2018–2024 гг.**Рис. 2.** Количество запущенных и работающих космических аппаратов, 2018–2024 гг.**Таблица 2.** Соотношение запущенных Starlink и работающих космических аппаратов, 2018–2024 гг.

Год запуска	Запущенные КА	Рабочие КА
2018	2	0
2019	120	37
2020	833	549
2021	989	838
2022	1722	1593
2023	1984	1911
2024	1982	1929
Всего	7632	6857

**Рис. 3.** Зависимость количества космических аппаратов Starlink, выведенных из эксплуатации, от времени

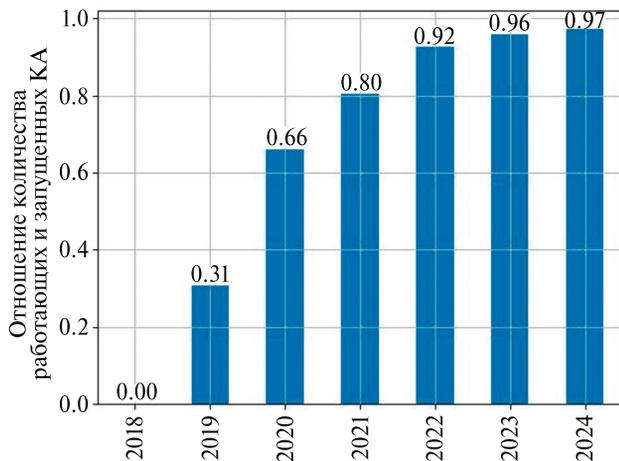


Рис. 4. Отношение количества функционирующих космических аппаратов Starlink к количеству выведенных на орбиту, 2018–2024 гг.

Хотя данные, представленные на рисунках 3 и 4, реально отражают результаты функционирования спутниковой системы Starlink, они носят оценочный характер, так как КА Starlink, несмотря на общие технологические решения, отличаются друг от друга, функционируют на разных (хотя и близких) орбитах, а часть аппаратов решает дополнительные задачи (межспутниковая лазерная связь, функции D2C и др.).

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНО ДОСТИЖИМОГО КОЛИЧЕСТВА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В СОСТАВЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ

В работе [5] рассмотрена задача определения количества месяцев, необходимого для развертывания орбитальной группировки с заданным количеством КА с учётом среднего числа КА, запущенных и отказавших в течение месяца, а также времени от запуска группы КА до начала их штатной работы с учётом ограничений на срок активного существования аппаратов.

Оценка максимально достижимого количества КА в составе орбитальной группировки – по сути, двойственная задача по отношению к рассмотренной в [5] и может быть сформулирована следующим образом. Необходимо определить количество КА в ОГ после завершения развертывания с учётом интенсивности запуска КА и их вывода из эксплуатации при ограничениях на срок активного существования.

Количество КА в составе группировки в момент времени T может быть определено, как

$$N(T) = \int_0^T (\lambda(t) - \mu(t)) dt, \quad (1)$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность производства КА и их запуска на орбиту, $\mu(t)$ – интенсивность их вывода из эксплуатации

Для расчёта числа КА в орбитальной группировке необходимо прежде всего иметь функции $\lambda(t)$ и $\mu(t)$ с учётом трудно формализуемых факторов, таких как возможности серийного производства разных типов КА, ограничения по выводу КА, отклонения от расчётного срока активного существования КА (аварии средств выведения, досрочный вывод из эксплуатации из-за технических неисправностей, необходимости частого маневрирования и влияния космической погоды, функционирование за пределами САС и др.).

Применительно к спутниковой системе Starlink выражение (1) может быть приведено к виду

$$N(T) = \sum_{0 \leq t_i \leq T} N_i(t_i) \omega(T, t_i, T_c + T_c), \quad (2)$$

где t_i – время запуска КА, $N_i(t_i)$ – количество КА, выведенных на орбиту за один запуск в момент времени t_i , T_c – срок активного существования КА; при этом $\omega(T, t_i, T_c + T_c) = 1$, если $t_i \leq T \leq t_i + T_c$, и $\omega(T, t_i, T_c + T_c) = 0$ в ином случае.

В предположении, что срок активного существования T_c является фиксированной величиной и все КА работоспособны в течение указанного срока, выражение (2) при выполнении условия $T > T_c$ позволяет определить оценку сверху количества КА в составе орбитальной группировки N_m . Фактически выражение (2) описывает систему массового обслуживания с бесконечным количеством обслуживаемых элементов и временем обслуживания, равным T_c . В этом случае

$$N(T) \leq N_m = \lambda_m T_c, \quad (3)$$

где $\lambda_m = \sum_{T_2 \leq t_i \leq T} \hat{m}(N_i(t_i)) / (T_2 - T_1)$, $\hat{m}(N_i(t_i))$ – оценка математического ожидания количества КА, выводимых на орбиту за один запуск. Соответствующие зависимости N_m от λ_m и T_c приведены на рисунке 5.

Физический смысл выражения (3) состоит в том, что, если в год производится и выводится на орбиту m КА, а САС КА T_A равен n годам, то первые n лет происходит наращивание группировки до mn КА, а с года $n+1$ и далее производится только восполнение ОГ с учётом вывода из эксплуатации КА, запущенных n годами ранее. В соответствии с этим количество КА в орбитальной группировке не может превышать величину, равную количеству КА, запущенных за время, равное сроку активного существования. Основные характеристики расчётного потока запусков для КА Starlink v2.0 mini N_i (количество одновременно запускаемых КА) и $\tau_i = t_{i+1} - t_i$ (интервал времени между запусками) приведены в таблице 3.

Достигнутое к 2025 г. количество запусков составляет 90 в год при количестве N_i одновременно выводимых КА за один запуск 21–24 (табл. 3).

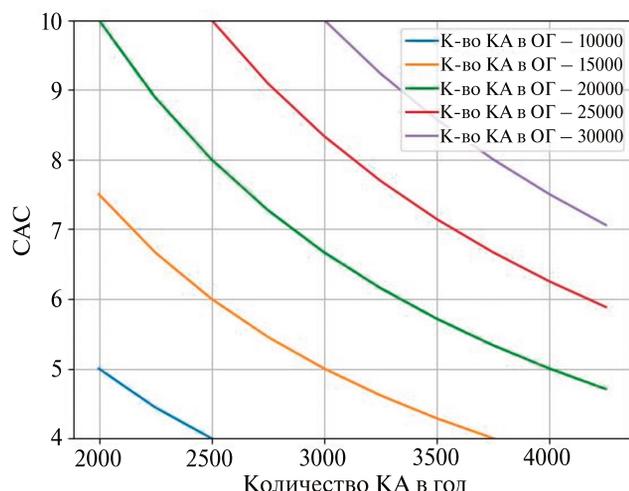


Рис. 5. Достижимое количество космических аппаратов в орбитальной группировке в зависимости от их срока активного существования и числа КА, запускаемых за год

В соответствии с этим количество потенциально выводимых на орбиту КА Starlink в год λ_m достигает примерно 2000.

Необходимость увеличения количества запусков, по сравнению с 2023 г., связана с переходом на КА v2.0 mini с большей массой, по сравнению с КА более ранних модификаций [5, 8, 9], с учётом того, что $\tau_i \ll T_c$, использование для оценивания λ_m в выражении (3) величин N_i и τ_i их математических ожиданий представляется обоснованным.

Заявленный срок активного существования КА Starlink составляет пять лет [5], в ряде источников – 5–7 лет. Этот срок – результат расчётов, основанных на массе рабочего тела, необходимого для манёвров на орбите без учёта неудачных запусков, выхода из строя КА из-за неработоспособности целевой и служебной аппаратуры и функционирования КА за пределами расчётного срока. То есть реальный САС

T_c^* является случайной величиной, которая описывается некоторой неизвестной функцией плотности вероятности (ФПВ). Статистика вывода из эксплуатации КА в период 2018–2024 гг. позволяет получить непараметрическую оценку ФПВ (табл. 4) и оценку математического ожидания реального САС (в годах) $m(T_c^*) = 5.32$, что превышает расчётный срок активного существования, равный пяти годам.

По этой причине для оценки сверху N_m в выражении (3) может быть использована величина $T_A = 6$, а для получения оценки с учётом вывода из эксплуатации КА до окончания срока активного существования – величина $T_c = \hat{m}(T_c^*)$. Достигнутые в соответствии с этим к 2025 г. показатели функционирования спутниковых систем позволят развернуть и поддерживать орбитальную группировку в составе до 12000 КА при САС КА 6 лет (оценка сверху) и около 10700, если темпы вывода на орбиту и уровень потерь КА сохранятся в последующие годы.

На рисунке 6 показана возможная динамика развёртывания орбитальной группировки Starlink, начиная с количества работающих КА в составе ОГ в декабре 2024 г. (см. табл. 2), без учёта и с учётом потерь КА до истечения срока. Как видим, расширение орбитальной группировки до 15000–20000 КА потребует увеличения количества запускаемых аппаратов до 3500 и более и/или увеличения САС до 7–10 лет.

Производственный потенциал компании SpaceX делает возможным запуск до 3500 КА в год, но использование ракеты-носителя Falcon 9 для КА Starlink v2.0 mini потребует более 150 запусков в год или использования ракеты-носителя другого класса. Частично данную проблему решает разработка более лёгкой версии спутника v2.0 mini, что позволит ракете Falcon 9 выводить на орбиту больше (предположительно до 27–29) спутников за один запуск. Однако для следующих поколений КА ситуация усложняется вследствие устойчивой тенденции к уве-

Таблица 3. Характеристики расчётного потока запусков космических аппаратов

№ пп	Характеристика	Математическое ожидание	Среднеквадратичное отклонение	Диапазон изменения
1	N_i (шт.)	22,02	1,75	21–24
2	$\tau_i = t_{i+1} - t_i$ (дни)	4,03	3,35	0–5 для 90% значений

Таблица 4. Срок активного существования космических аппаратов и функция плотности вероятности

Диапазон САС КА, лет	0–1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6
Оценка ФПВ	0.028	0.014	0.034	0.122	0.144	0.659

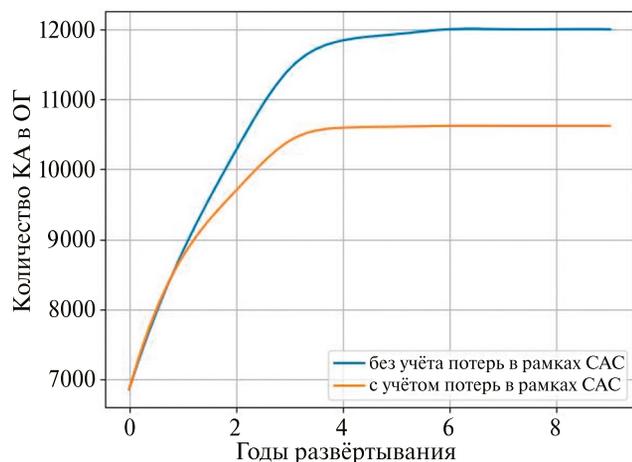


Рис. 6. Оценка динамики развертывания орбитальной группировки Starlink

личению их массы от версии к версии. Достижение срока активного существования КА в 7–10 лет для малых КА на низких орбитах требует обоснования, но статистических данных для оценки реального САС КА v2.0 mini в настоящее время недостаточно.

* * *

По состоянию на декабрь 2024 г. спутниковая система Starlink находилась в стадии развертывания. Уровень из примерно 12 тыс. КА версии v2.0 mini, одновременно функционирующих на орбите, может быть достигнут в короткие сроки даже при сроке активного существования КА, равном шести годам (реальный САС КА более поздних версий может быть увеличен). Нарращивание орбитальной группировки до 15–20 тыс. КА достижимо с учётом технологического потенциала компании SpaceX при условии увеличения интенсивности запуска КА и срока их активного существования.

Для других проектов необходимое условие создания подобных группировок — наличие технологий массового серийного производства КА и соответствующих ресурсов средств выведения. Исходя из этого появление на околоземной орбите других многоспутниковых систем аналогичной размерности (прежде всего СпС Китая и США) вполне реально.

Что касается активного вывода космических аппаратов Starlink на орбиты захоронения с последующим сгоранием в атмосфере, то этот процесс находится на начальной стадии, так как большая часть космических аппаратов функционирует менее расчётного срока.

Полученные оценки подтверждают необходимость комплексного анализа рисков создания многочисленных многоспутниковых систем на низких орбитах с учётом возрастающего количества работающих и выведенных из эксплуатации КА, присутствующих в околоземном пространстве. Кроме

того, необходимо оценить экологические риски, связанные со сгоранием большого количества КА в атмосфере. Только для СпС Starlink это несколько тысяч аппаратов массой 500–800 кг и более в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Урличич Ю.М. Старые и новые идеи в спутниковой связи // Первая миля. 2021. № 3. С. 14–21.
2. Бетанов В.В., Волков С.А., Данилин Н.С. и др. Проблемные вопросы создания многоспутниковых орбитальных группировок на базе малоразмерных космических аппаратов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2019. Т. 6. № 3. С. 57–65.
3. Балухто А.Н., Матвеев С.А., Хартов В.В. Основные принципы построения и организации функционирования интеллектуальных многоспутниковых систем на базе малых космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 6 (105). С. 127–140.
4. Балухто А.Н., Матвеев С.А., Матюшин М.М., Твердохлебова Е.М. Технологии искусственного интеллекта в управлении многоспутниковыми группировками // Космонавтика и ракетостроение. 2020. № 3 (114). С. 64–73.
5. Урличич Ю.М. Анализ низкоорбитальных спутниковых систем широкополосного доступа на примере развития Starlink // Электросвязь. 2024. № 7. С. 14–18.
6. Jonathan's Space Pages. <https://planet4589.org/space/con/conlist.html> (дата обращения 30.01.2025).
7. Gunter's Space Page. https://space.skyrocket.de/doc_sat/usa_secr.htm (дата обращения 30.01.2025).
8. Пехтерев С.В., Макаренко С.И., Ковальский А.А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 191–256.
9. Урличич Ю.М. Легенды о Startlink // Первая миля. 2023. № 6. С. 64–71.
10. Пехтерев С.В. Энциклопедия StarLink // CommNews. 2020. <https://www.comnews.ru/projects/encyclopedia-starlink> (дата обращения 30.01.2025).
11. Макаренко С.И. Помехозащищённость наземных абонентских терминалов системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 81–100.
12. Starlink или OneWeb — какой из проектов лучше и перспективнее? // DNS клуб. <https://club.dns-shop.ru/blog/t-326-internet/69218-starlink-ili-oneweb-kakoi-iz-proektov-luchshe-i-perspektivnee> (дата обращения 30.01.2025).
13. Давайте разберёмся. Состояние спутниковой группировки Starlink. <https://habr.com/ru/articles/652467/> (дата обращения 30.01.2025).

ASSESSMENT OF THE PROSPECTS FOR DEPLOYING THE ORBITAL GROUP OF THE STARLINK SATELLITE SYSTEM

I.A. Sheremet^{a,*}, S.A. Matveyev^{**}

^a*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: sheremet@rfbr.ru*

^{**}*E-mail: smatveyev@rambler.ru*

The article presents generalized statistical data on the launches and decommissioning of spacecraft of the Starlink satellite system and estimates of their actual active life. The results of calculations of the achievable composition of the orbital grouping are given, taking into account and without taking into account the early decommissioning of spacecraft. The possibilities of further expansion of the Starlink orbital grouping are considered.

Keywords: Starlink, satellite system, spacecraft, orbital grouping, active life.