

## Оценка проектных параметров группировки информационных спутников IoT 5G

© Г.А. Щеглов, В.С. Таратонкина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Представлена методика оценки проектных параметров спутниковой группировки, работающей по принципу интернета вещей, которая позволяет определить влияние на общие проектные параметры группировки характеристик технологии связи пятого поколения 5G, используемой для передачи данных между космическими аппаратами (КА) и для связи КА с наземными станциями. Рассмотрены примеры спутниковой группировки связи со скоростью передачи данных 24 Гбит/с на круговых орбитах высотой 1000 км. Показано, что верхним ограничением выбора частоты передачи сигналов со спутника на Землю является энергопотребление КА, а нижним — скорость передачи данных и уровень сигнала. Необходимо также учитывать коэффициент усиления антенн, зависящий от частоты передачи сигналов и имеющий ограничения. Представлены результаты исследования зависимости расстояния между спутниками в группировке на орбите Земли и мощностью, потребляемой на борту КА. Показано, что при увеличении числа спутников в группировке в силу снижения мощности бортовой аппаратуры масса одного КА уменьшится в 1,4 раза, однако суммарная масса группировки возрастает практически в 1,5 раза, что потенциально увеличивает общую стоимость проекта.*

**Ключевые слова:** интернет вещей, спутниковая связь, сеть 5G/6G

**Введение.** В настоящее время при проектировании ракетно-космической техники обсуждается необходимость перехода к технологиям Индустрии 4.0. Этот термин, появившийся в 2015 г., обозначает тенденцию к автоматизации и обмену данными в производственных технологиях и процессах [1–4]. Он определяется такими основными компонентами, как киберфизические системы [5, 6], облачные и когнитивные вычисления [7], межмашинное взаимодействие [8], интернет вещей.

Интернет вещей (*англ.* Internet of Things, IoT) — это концепция сети передачи данных между физическими объектами («вещами»), оснащенная внутренними технологиями сбора и передачи информации в совокупности с устройствами и технологиями хранения и интеллектуальной обработки информации, а также устройствами и алгоритмами генерации управляющих воздействий [9–12].

В рекомендации Международного союза электросвязи представлены определения следующих терминов: под «вещами» понимается физический объект (физическая вещь) или объект виртуального (информационного) мира (виртуальная вещь, например, мультимедийный контент или прикладная программа), которые могут быть

идентифицированы и объединены через коммуникационные сети [11]. Кроме понятия «вещь» также используется понятие «устройство», под которым понимается часть оборудования с обязательными возможностями по коммуникации и необязательными возможностями по измерению/зондированию, приведению в действие вещи, сбору, обработке и хранению данных. Виртуальные вещи могут существовать без их физических воплощений, в то время как физическим объектам/вещам обязательно соответствует как минимум один виртуальный объект. Эталонная модель IoT включает в себя базовые уровни устройств (вещей), коммуникационных технологий и платформ для программно-аппаратных платформ, чтобы поддерживать приложения [11]. В результате анализа приведенных определений можно сформулировать цель интернета вещей: собирать, обрабатывать и передавать данные с границ сети в централизованные облачные системы управления киберфизических систем.

Проблемами интернета вещей являются: пропускная способность каналов передачи данных; стандартизация и совместимость устройств; масштабируемость и автоматическое администрирование; информационная безопасность [13]. Многие из указанных проблем могут быть решены при переходе на новый технологический стандарт телекоммуникаций — мобильную связь пятого поколения (5G) [14]. Для сети 5G характерны высокая скорость передачи данных, высокая пропускная способность, возможность прямого соединения между устройствами, без использования ретрансляторов.

#### Техническая характеристика 5G

Скорость, Гбит/с:	
5G .....	1...2
в экспериментальных сетях.....	25
рекордная .....	35
Задержки, мс.....	1
Количество одновременных подключений устройств на 1 км <sup>2</sup> местности .....	1 · 10 <sup>6</sup>
Дальность 5G (на Земле):	
при прямой видимости, км .....	До 1–2
от базовой станции, в среднем, м .....	300–700

Разработчики сетей связи нового поколения хотят использовать широкий спектр частот в зависимости от решаемых задач и подключаемых устройств. Диапазон 700 МГц вместе с 3,4...3,8 ГГц планируется выделить для работы беспилотных автомобилей, роботов и автоматизированного оборудования в промышленности. Это связано с тем, что именно в этих частотных диапазонах 5G может передавать данные без задержек и поддерживать максимально устойчивое соединение даже с быстро движущимися объектами [15]. В России одним из выделенных диапазонов под сеть 5G является 4,7...4,9 ГГц,

так как диапазон частот 3,4...3,8 ГГц занят [16]. Высокие частоты необходимы для достижения максимальной пропускной способности, вплоть до 20 Гбит/с [17]. Особенности технологии 5G включают [14]: полный дуплекс (способность устройств принимать и передавать сигналы одновременно); пространственное кодирование сигнала с использованием многоантенных систем (*англ.* massive Multiple Input Multiple Output, сокращенно massive MIMO) [18]; малый размер соты (вследствие быстрого затухания сигнала миниатюрные базовые станции необходимо размещать через каждые 250 м в зоне покрытия); миллиметровые волны с длиной волны 5G от 1 до 10 мм (от 30 до 300 ГГц); формирование луча (*англ.* beamforming) методами обработки сигналов для обеспечения направленной приемопередачи.

Актуальной задачей является применение технологий 5G для передачи данных в космосе. Недостатком спутников связи, расположенных на геостационарной орбите, является задержка сигнала 125 мс, что не подходит для приложений IoT, которые работают в реальном времени, например, сенсорные сети для автономного вождения автомобилей [19, 20]. Спутники на низкой околоземной орбите (НОО) обладают потенциалом для реализации связи 5G с наземными объектами с планируемой задержкой сигнала в несколько миллисекунд [21]. Однако недостатком низкоорбитальных спутников связи является то, что для обеспечения непрерывного покрытия Земли необходимы большая группировка спутников, а также более сложное наземное оборудование для компенсации доплеровского сдвига и для управления связью между спутниками.

Основная проблема — это оптимизация маршрутизации при поддержке большого количества подключенных устройств IoT [26]. Активной областью исследования является интеграция космических, воздушных и наземных сетей передачи данных. Подобная технология организации сети — Space, Air, and Ground IoT (SAG-IoT), которая интегрирует спутниковую связь, воздушную связь, технологии пятого поколения и IoT. Каждый узел в космосе, воздухе, на Земле взаимодействует и координирует свои действия для эффективной передачи информации [22]. Примером применения SAG-IoT является «умный» город. Технология Heterogeneous Space and Terrestrial Integrated Networks (H-STIN) [23] имеет интегрированный космический и наземный шлюзы, автономную систему, реализующую распределение управления и управление ресурсами, а также центр обработки данных, который собирает информацию о таблице маршрутизации, скорости сети и др. [23].

Технологии беспроводной связи, такие как Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) [24], Long Range (LoRa) [25], ранее были очень затратными, поскольку требовалось обеспечить широкомасштабное покрытие. С появлением спутников форм-фактора CubeSat стала

возможна реализация глобальной связи с относительно низкими затратами [26]. Однако недостатками по-прежнему остаются глобальное покрытие земной поверхности и низкая скорость передачи данных [25]. В [27] описана технология LPWAN применительно к спутниковым низкоорбитальным системам, поддерживающим интернет вещей.

В настоящее время известны компании, использующие спутники для наземных сетевых приложений на основе интернета вещей, например, SpaceX Starlink [28–30] и Mynriota [21]. По данным источника [31], можно сделать вывод, что с 2002 г. по 2022 г. было зарегистрировано около 40 коммерческих зарубежных созвездий КА с целевой функцией интернета вещей. Однако практически ни одна из группировок полностью не развернута, а системы, которые разрабатывались в начале XXI века, неактуальны для современного интернета вещей. По данным источников [31–33], некоторые низкоорбитальные системы IoT и их параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Низкоорбитальные спутниковые системы 5G

Название, страна	Высота орбиты, км	Частота	Запущенное/общее количество КА (первый запуск)	Скорость передачи данных	Примечания
Orbcomm (OG2), США	700–750	137–153 МГц	51/52, (2012)	2,4 кбит/с – вверх; 4,8 кбит/с – вниз	Платформа – SN-100A; масса – 172 кг; мощность – 400 Вт; объем пакета данных – 370 байт [33]
Fleet Space, Австралия	530–550	От 312 МГц до 2,11 ГГц	7/140 (2018)	9,6–19,2 кбит/с; 520 кбит/с [33]	Поддерживает несколько диапазонов частот; объем пакета данных – 230 байт [33]
Системы Fossa, Испания	530 [33]	435–438 МГц	17/80 (2019)	1 Мбит/с	Пикоспутник 5×5×5 см; платформа – LoRa; мощность – 9 Вт; объем пакета данных – 240 байт [33]
Yinhe, Китай	637	33–75 ГГц	7/1000 (2020)	10 Гбит/с	Масса – 227 кг

В России в 2018 г. был объявлен федеральный проект «Сфера» — создание глобальной многофункциональной инфокоммуникационной спутниковой системы [34], который предполагает, в частности, развертывание группировок со спутниками широкополосного доступа в Интернет «СКИФ» на средних орбитах и спутниками для обеспечения

интернета вещей «Марафон IoT», использующими технологии LPWAN [27, 36], на низких орбитах. В табл. 2 указаны параметры этих аппаратов.

Таблица 2

Параметры информационных спутников системы «Сфера»

Параметр	«Скиф»	«Марафон IoT»
Габариты, см: – в стартовом положении – в рабочем положении	82×73×88 82×320×88 [35]	75×75×32,5 [36] –
Срок активного существования	3 года [35]	4–5 лет [27]
Высота орбиты, км [34]	8070	750
Число КА [34]	12	264
Число орбитальных плоскостей	3	12
Масса КА, кг	148 [35]	45–50 [34]
Пропускная способность	320 Мбит/с [37]	–
<i>Примечание.</i>	Энергопотребление 250 Вт, коэффициент усиления антенн 18 дБ [35]	Поддерживаются частоты 2 ГГц и 868 МГц [38]

Российская компания «Спутникс» планирует в 2023 г. запустить первый КА для тестирования услуг спутникового IoT, чтобы к 2026 г. построить низкоорбитальную группировку из 100 КА, основным назначением которой будет промышленный интернет вещей для предприятий на удаленных территориях [39].

Частная компания SR Space планирует запустить в 2024 г. на высоту около 600 км спутник IoT массой 460 кг, оснащенный аппаратурой связи с пропускной способностью 40 Гбит/с [39].

Проведенный обзор работ показывает актуальность разработки методик определения проектных параметров спутниковой группировки с целевой функцией интернета вещей, использующей сети 5G для передачи данных между КА в космическом пространстве и для связи КА с наземными станциями.

Цель настоящей работы — разработка упрощенной методики, пригодной для первичной оценки проектных параметров группировки информационных спутников IoT 5G. По этой методике предполагается определение, на основе данных о частоте для передачи сигналов между спутниками в группировке и на наземные станции, параметров рабочих орбит, минимального количества КА в группировке, а также массы и энергопотребления космического аппарата.

**Методика оценки проектных параметров. Выбор орбиты.** Для организации глобального покрытия земной поверхности зоной связи IoT 5G группировкой спутников выбирается система низких околоземных круговых орбит [40] с равными высотами:

$$h \geq \frac{R_3 \cos \gamma}{\sin(i - \gamma)} R_3, \quad (1)$$

где  $R_3$  — радиус Земли,  $R_3 = 6378$  км;  $\gamma$  — минимальный угол места над горизонтом;  $i$  — наклонение орбиты, которое целесообразно выбирать ближе к  $90^\circ$ , чтобы КА имели возможность обозревать всю поверхность Земли, включая полярные области.

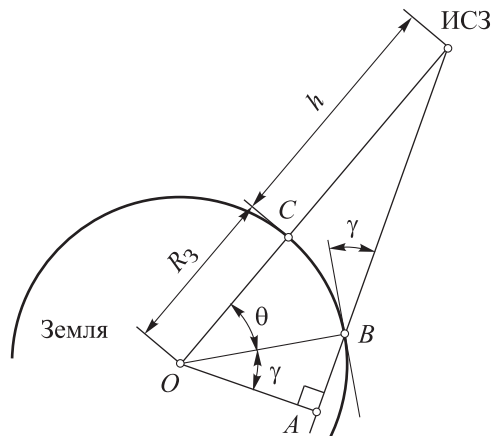
**Определение количества спутников в группировке.** Диаметр зоны видимости рассчитаем по формуле

$$D = 2R_3 \left( \frac{\pi}{2} - \gamma - \arcsin \left( \frac{R_3 \cos \gamma}{R_3 + h} \right) \right). \quad (2)$$

При расчетах вводится предположение о сферичности Земли, что позволяет вычислять по аналогии с [40] минимальное число орбитальных плоскостей  $N_p$  для обзора окружности экватора:

$$N_p = 2\pi R_3 / D. \quad (3)$$

Для того чтобы узнать количество КА в одной орбитальной плоскости, определим угол зоны видимости аппарата  $\theta$ , как показано на рис. 1.



**Рис. 1.** К расчету угла зоны видимости спутника: точки  $C$  и  $B$  определяют зону видимости на орбите

Учитывая, что у каждого спутника зона видимости равна  $2\theta$ , получим выражение для числа спутников:

$$N_s = \frac{\pi}{\theta} = \pi / \left[ \arccos \left( \frac{R_3 \cos \gamma}{R_3 + h} \right) - \gamma \right]. \quad (4)$$

Вычисленные по формулам (3) и (4) значения следует округлить в большую сторону.

Общее число спутников в группировке определяется по формуле

$$N = N_P N_S.$$

**Алгоритм расчета потребляемой мощности.** Для того чтобы обеспечить надежную передачу сигнала, необходимо выполнение уравнения бюджета радиолинии [41]:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FS} - L_M + G_{RX} - L_{RX}, \quad (5)$$

где  $P_{RX}$  — принимаемая мощность, дБ·м;  $P_{TX}$  — выходная мощность передатчика, дБ·м;  $G_{TX}$  — коэффициент усиления антенны передатчика, дБ;  $L_{TX}$  — потери передатчика, дБ;  $L_{FS}$  — потери при передаче, дБ;  $L_M$  — различные потери, дБ;  $G_{RX}$  — коэффициент усиления приемной антенны, дБ;  $L_{RX}$  — потери приемника, дБ.

В уравнении (5) уровни мощности выражаются в [дБ·м], прирост и потери мощности выражаются в [дБ], что является логарифмическим показателем, поэтому добавление децибел эквивалентно умножению фактических коэффициентов мощности.

В общем случае потери при передаче сигнала вычисляются по формуле [42]

$$L(\text{дБ}) = 20 \lg(f) + 20 \lg(R) - 10 \lg(G_{TX}) - 10 \lg(G_{RX}) + 32,44, \quad (6)$$

где  $f$  — частота, МГц;  $R$  — расстояние передачи сигналов, км.

При выполнении расчетов примем допущение, что  $L_{TX} = L_{RX} = L_M = 0$ , а  $L_{FS}$  определяется по формуле (6). Следовательно, получим уравнение [27]

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{FS} + G_{RX}. \quad (7)$$

Запишем согласно [43] уравнение дальности связи

$$P_{TX} = \frac{16\pi^2 P_{RX} R^2 \eta_{TX} \eta_{RX} U}{G_{RX} G_{TX} \lambda^2}, \quad (8)$$

где  $R$  — дальность передачи сигнала, км;  $\eta_{TX}$ ,  $\eta_{RX}$  — потери в антенно-фидерном устройстве,  $\eta_{TX} = 2...3$  дБ,  $\eta_{RX} = 0,5...1$  дБ;  $\lambda$  — длина волны, м,  $\lambda = \frac{c}{f_c}$  ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света;  $f_c$  — средняя частота);  $U$  — затухание сигнала в осадках,  $U = 1,5...3$  дБ.

Коэффициенты усиления антенн в [дБ]:

$$G_{RX} = 10 \lg \left( \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \gamma_A \right), \quad (9)$$

где  $d$  — диаметр антенны спутника, м;  $\gamma_A$  — коэффициент использования поверхности зеркала,  $\gamma_A = 0,6 \dots 0,8$  [43].

Коэффициенты усиления антенн можно определить следующим образом:

$$K_{ПП} = \frac{4\pi S_{ПП}}{\lambda^2}, \quad (10)$$

где  $S_{ПП} = \frac{\pi D_{ПП}^2}{4}$  — эффективная площадь приемной антенны, м<sup>2</sup>.

Мощность на входе радиоприемника вычисляется по формуле [44]

$$P_{прм} = k T_0 C_{сш} K_{сш} \Delta f_{пр} = 4 \cdot 10^{-21} \cdot 2,5 \cdot V = 10^{-20} \cdot V \text{ [Вт]}, \quad (11)$$

где принято  $C_{сш} K_{сш} = 2,5$ ;  $C_{сш}$  — коэффициент сигнала;  $K_{сш}$  — коэффициент шума;  $k$  — спектральная мощность шума при стандартной температуре;  $T_0$  — стандартная температура,  $T_0 = 290\text{К}$ ;  $\Delta f_{пр}$  — полоса пропускания, Гц;  $V$  — скорость передачи цифровой информации, бит/с.

Чувствительность радиоприемника может быть в пределах значений  $10^{-9} \dots 10^{-19}$  Вт [45]. Для обеспечения устойчивой радиосвязи мощность на входе наземного радиоприемника должна превышать реальную чувствительность, т. е. должно выполняться условие [44]:

$$P_c > P_{прм}.$$

Чувствительность радиоприемника рассчитываем как отношение

$$P_c = \frac{P_a K_{пер} S_{пр}}{4\pi R^2 U}, \quad (12)$$

где  $P_a$  — мощность передатчика спутниковой антенны.

Теперь из формулы (12) определяем:

$$P_a = \frac{4\pi R^2 P_c U}{K_{пер} S_{пр}}. \quad (13)$$

Найденное из (13) значение  $P_a$  соответствует  $P_{TX}$ , а  $P_{прм}$  — значению  $P_{RX}$  в формулах (5), (7)–(8).

Далее делаем проверку уровня сигнала  $P_{RX}$  согласно [46]. Проверку максимального расстояния передачи сигнала можно выполнить



по формуле (8). Потребляемую мощность для передачи сигнала вычислим по формуле [47]

$$P_{\text{потр}} = \frac{P_a}{Q\eta_r\eta_m\eta_v\eta_t}, \quad (14)$$

где  $Q$  — скважность сигнала (отношение периода следования импульсов к длительности импульса);  $\eta_r$  — КПД генераторного прибора, примем  $\eta_r = 0,9$ ;  $\eta_m$  — КПД модулятора,  $\eta_m = 0,7 \dots 0,8$ ;  $\eta_v$  — КПД выпрямителя,  $\eta_v = 0,8 \dots 0,9$ ;  $\eta_t$  — КПД трансформатора,  $\eta_t = 0,6$ .

**Определение площади солнечных батарей КА.** Площадь солнечных батарей (СБ) рассчитаем по выражению [48]

$$S_{\text{сб}} = \frac{N_{\text{пот}}}{q_c r^{-2} \eta F_{\text{сб}} \cos(\Gamma)}, \quad (15)$$

где  $N_{\text{пот}} = P_{\text{пот}}$  — потребляемая мощность;  $q_c$  — солнечная постоянная на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца вне атмосферы ( $1366 \text{ Вт/м}^2$ );  $r$  — расстояние КА от Солнца, а. е. (у Земли  $r = 1,0$ );  $\eta$  — КПД фотоэлектрического преобразования (ФЭП);  $F_{\text{сб}}$  — коэффициент деградации солнечной батареи вследствие влияния космического пространства;  $\Gamma$  — ориентация солнечной батареи относительно Солнца, определяется как угол между направлением на Солнце и нормалью к поверхности солнечной батареи.

Масса солнечных батарей определяется по формуле [48]

$$M_{\text{с.б}} = (1 + \gamma_{\text{кон}} + \gamma_{\text{мех}}) M_{\text{ФЭП}}, \quad (16)$$

где  $\gamma_{\text{кон}}$  — удельная масса конструкции;  $\gamma_{\text{мех}}$  — удельная масса механизмов и кабельной сети;  $M_{\text{ФЭП}}$  — общая масса отдельных элементов,  $M_{\text{ФЭП}} = m_{\text{ФЭП}} n_{\text{ФЭП}}$  ( $m_{\text{ФЭП}}$  — масса отдельного элемента,  $n_{\text{ФЭП}}$  — количество элементов, входящих в солнечную батарею); также  $M_{\text{ФЭП}} = S_{\text{сб}} \lambda$  ( $\lambda$  — удельная масса ФЭП,  $\text{кг/м}^2$ ).

При компоновке в виде раскрывающихся панелей [48]:

$$\gamma_{\text{кон}} = (0,90 \dots 0,95) M_{\text{ФЭП}}. \quad (17)$$

Примем, что удельная масса механизмов и кабельной сети [48]

$$\gamma_{\text{мех}} = 0,55 M_{\text{ФЭП}}. \quad (18)$$

Определив массу солнечных батарей, переходим к массовому анализу КА.

**Массовый анализ КА.** Массу КА представим в следующем виде [49]:

$$M_{КА} = M_{п.н} + M_{ДУ} + M_{Т} + M_{б} + M_{к} + M_{СУ} + M_{СТР} + M_{СЭО} + M_{Т.М} + M_{пр}, \quad (19)$$

где  $M_{п.н}$  — масса полезной нагрузки;  $M_{ДУ}$  — масса двигательной установки (ДУ);  $M_{Т}$  — масса топлива;  $M_{б}$  — масса баков и системы подачи топлива;  $M_{к}$  — масса конструкции;  $M_{СУ}$  — масса системы управления;  $M_{СТР}$  — масса системы терморегулирования;  $M_{СЭО} = M_{с.б} + M_{аккум}$  — масса системы энергообеспечения ( $M_{аккум}$  — масса аккумуляторов);  $M_{Т.М}$  — масса телеметрической аппаратуры;  $M_{пр}$  — прочие массы.

Массы, входящие в формулу (19), можно представить безразмерными статистическими коэффициентами:

$$\gamma_{ДУ} = \frac{M_{ДУ}}{M_{КА}}; \quad \gamma_{СУ} = \frac{M_{СУ}}{M_{КА}}; \quad \gamma_{СТР} = \frac{M_{СТР}}{M_{КА}}; \quad \gamma_{к} = \frac{M_{к}}{M_{КА}};$$

$$\gamma_{Т.М} = \frac{M_{Т.М}}{M_{КА}}; \quad \gamma_{пр} = \frac{M_{пр}}{M_{КА}}.$$

Массу систем энергообеспечения в зависимости от потребляемой мощности  $N_{пот}$  можно выразить таким образом:

$$M_{СЭО} = \sigma N_{пот} + M_{аккум},$$

где  $\sigma = \frac{(1 + \gamma_{кон} + \gamma_{мех})\lambda}{q_c r^{-2} \eta F_{сб} \cos(\Gamma)}$  — некоторый коэффициент, принимающий значения 0...15 кг/кВт для фотопреобразователей на основе арсенида галлия и 15...20 кг/кВт — для фотопреобразователей на основе кремния.

Массу топлива вычислим по формуле К.Э. Циолковского

$$M_{Т} = M_{КА} \left( 1 - \exp\left(-\frac{\Delta V_{\Sigma}}{J}\right) \right), \quad (20)$$

где  $\Delta V_{\Sigma}$  — суммарный запас характеристической скорости, необходимый для выполнения маневров, стабилизации, ориентации и коррекции орбиты КА;  $J$  — удельный импульс ДУ.

Коэффициент массы баков рассчитывается в долях от массы топлива:

$$\gamma_6 = \frac{M_6}{M_T}. \quad (21)$$

С учетом статистических коэффициентов формула для определения массы КА имеет вид

$$M_{КА} = \frac{M_{п.н}}{1 - (1 + \gamma_6) \left( 1 - \exp\left(-\frac{\Delta V_{\Sigma}}{J}\right) \right) - \Sigma \gamma}, \quad (22)$$

где

$$\Sigma \gamma = \gamma_{ДУ} + \gamma_6 + \gamma_k + \gamma_{СТР} + \gamma_{БКС} + \gamma_{Т.м} + \gamma_{СУ} + \gamma_{СЭО}. \quad (23)$$

**Пример применения методики.** При выборе наклона орбиты необходимо учитывать возможности запуска ракеты-носителя (РН) с космодрома [50]. Предположим, что вывод группировки спутников с космодрома Плесецк осуществляется РН легкого класса типа «Рокот» или «Ангара-1», что определяет наклонение орбит  $i = 75,3^\circ$ . Отсутствие влияния остаточной атмосферы и воздействия первого радиационного пояса задает диапазон высот орбит ( $700 \text{ км} \leq h \leq 1500 \text{ км}$ ), из середины которого выбираем орбиту высотой  $h = 1000 \text{ км}$ , что соответствует углу места над горизонтом  $\gamma \approx 18,4^\circ$ .

Согласно формулам (2)–(4), получим  $D = 4818 \text{ км}$ ,  $N_P = 9$  и  $N_S = 5$ . Следовательно, группировка содержит как минимум  $N = 45$  спутников.

Определим потребляемую антеннами мощность для связи с наземными станциями. Передача информации осуществляется при частоте 4,85 ГГц, так как, согласно источнику [16], диапазон 4,8...4,9 ГГц планируется предоставить сети 5G в России.

*Исходные данные:*  $f = 4,85 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ ; площадь наземной антенны выбрана  $S_{пр} = 1,2 \text{ м}^2$  для обеспечения коэффициента усиления приемной антенны меньше 36 дБ; диаметр антенны спутника принимаем  $d = 0,7 \text{ м}$ , его уменьшение приводит к увеличению потребляемой мощности. Примем расстояние передачи сигнала равным высоте орбиты, а скорость передачи данных — не менее  $V = 24 \text{ Гбит/с}$ . Две антенны на КА для сообщения с наземными станциями работают на прием и передачу информации соответственно.

По формуле (10) определяем коэффициент усиления приемной наземной антенны  $K_{пр} = 36 \text{ дБ}$ . Коэффициент усиления спутниковой антенны считаем по формуле (9), где  $\gamma_A = 0,8$ . Подставив значения, получим  $G_{ТХ} = 1011$  (соответствует 30 дБ).

Мощность, вычисленная по формуле (11),  $P_{\text{прм}} = 2,4 \cdot 10^{-10}$  Вт. Чувствительность радиоприемника  $P_c$  должна находиться в диапазоне от  $10^{-9}$  до  $10^{-19}$ . Следовательно, выбираем такую чувствительность радиоприемника, чтобы выполнялось условие  $P_c > P_{\text{прм}}$ . В этом случае  $P_c = 10^{-9}$  Вт.

Определим мощность передатчика: коэффициент, который учитывает потери в атмосфере, берем  $U = 3$  дБ из источника [43], и тогда  $P_a = 22$  Вт. Выполним проверку уровня сигнала по графику зависимости уровня принимаемой мощности от расстояния передачи сигнала, приведенному на рис. 2 [46]. Приняв значения  $\eta_r = 0,9$ ;  $\eta_m = 0,75$ ;  $\eta_b = 0,85$ ;  $\eta_t = 0,6$ , по формуле (14) получим  $P_{\text{потр}} = 64$  Вт. Считаем, что спутник имеет две антенны для связи с наземными станциями, следовательно, потребляемая мощность полезной нагрузки составляет  $P_{\text{пот}} = 128$  Вт.

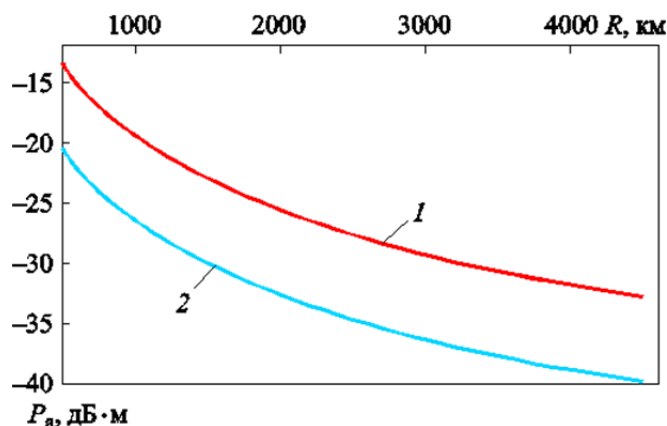


Рис. 2. Зависимость уровня принимаемой мощности от расстояния передачи сигнала:

1 — связь между спутниками ( $f = 24$  ГГц);  
2 — связь с наземными станциями ( $f = 4,85$  ГГц)

Анализируя представленные в табл. 3 результаты, делаем вывод, что при числе 45 спутников в группировке суммарная потребляемая мощность радиосистем составляет около 11 кВт. Следовательно, необходимо увеличивать число спутников в группировке, чтобы уменьшить потребляемую мощность передающих антенн.

## Результаты расчета

Передача сигнала	Спутник – Земля		Спутник – спутник (одна орбита)		Спутник – спутник (смеж- ные орбиты)	
<i>Исходные данные</i>						
Частота передачи сигнала $f$ , ГГц	6	17	23	6	23	
Расстояние передачи сигнала, км	1000		5050		4560	
Площадь приемной антенны $S_{пр}$ , м <sup>2</sup>	1		0,07			
$\gamma_A$ [43]	0,6		0,8			
$U$ [43], дБ	3		0			
$V$ , Гбит/с	24					
$\eta_r$	0,9		0,9			
$\eta_m$	0,75		0,8			
$\eta_b$	0,85		0,9			
$\eta_t$	0,6		0,6			
<i>Полученные результаты</i>						
Коэффициент усиления приемной антенны $K_{пр}$ , дБ	37		36	25	36	
Коэффициент усиления передающей антенны $G_{ТХ}$ , дБ	31	40				
Мощность на прием $P_{прм}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$ Вт					
Чувствительность $P_c$ [45]	$10^{-9}$ Вт					
Мощность спутниковой антенны $P_a$	20 Вт	2,5 Вт	1,14 кВт	14 кВт	0,9 кВт	
Потребляемая мощность $P_{пот.}$ :	для одной антенны	58 Вт	7,3 Вт	2,9 кВт	–	2,3 кВт
	для двух антенн	116 Вт	14,6 Вт	5,8 кВт	–	4,6 кВт

**Исследование зависимости потребляемой мощности от расстояния передачи сигнала между спутниками.** С использованием разработанной выше методики рассмотрим изменение мощности при уменьшении расстояния между спутниками. На каждом спутнике установлены четыре антенны для передачи и приема пакетов данных между соседними спутниками в группировке. Введем предположение, что расстояние между соседними КА на одной орбите равно расстоянию между КА на соседних орбитах.

*Исходные данные:* диаметр антенн 0,3 м; частота передачи сигнала 23 ГГц; коэффициент усиления антенн 36 дБ; скорость передачи данных 24 Гбит/с, следовательно, чувствительность приемника  $10^{-9}$  Вт.

При расчете потребляемой мощности КПД приборов остаются неизменными. Варьируемым параметром является только расстояние между спутниками. Результаты расчета представлены в табл. 4.

## Результаты расчета

Расстояние между спутниками, км	$P_a$ , Вт	$P_{\text{пот}}$ , Вт	$P_{\text{пот}\Sigma}$ , Вт	$S_{\text{сб}}$ , м <sup>2</sup>
4000	714,5	1837,7	7350,7	19,8
3000	401,9	1033,7	4134,8	11,3
2000	178,6	459,4	1837,7	5,2
1000	44,7	114,9	459,4	1,5
500	11,2	28,7	114,9	0,6

Примем расстояние между спутниками низкой околоземной группировки равным 3500 км. Таким образом, новый вариант группировки располагается на семи орбитальных плоскостях по 13 КА в каждой плоскости. Передача сигнала между спутниками будет происходить на частоте 24 ГГц, так как, согласно источнику [51], чтобы обеспечить передачу данных на скорости 24 Гбит/с, необходима как минимум частота 24 ГГц.

*Исходные данные:*  $f = 24 \cdot 10^9$  Гц; диаметр приемной антенны равен диаметру передающей антенны, а значит,  $d = 0,32$  м (здесь диаметр увеличен, чтобы обеспечить коэффициент усиления антенн менее 36...37 дБ). Коэффициенты усиления данных антенн также равны. Площадь приемной/передающей антенны вычисляем по формуле для  $S_{\text{пр пер}}$  и подставляем в выражение (9); коэффициент усиления

$G_{\text{ТХ}} = 5012$  (соответствует 37 дБ) при  $\gamma_A = 0,8$ . Скорость передачи данных не изменяется, т. е. она равна 24 Гбит/с. Следовательно,  $P_{\text{прм}} = 2,4 \cdot 10^{-10}$  Вт и  $P_c = 10^{-9}$  Вт.

Мощность передатчика определяем по формуле (13). Коэффициент, который учитывает потери при передаче, здесь принимаем равным нулю, так как сигнал передается в космическом пространстве. Получаем  $P_a = 382$  Вт = 0,38 кВт. Делаем проверку уровня  $P_a$  по [46] (см. рис. 2). Потребляемая мощность при передаче сигнала, рассчитанная по формуле (14),  $P_{\text{потр}} = 0,98$  кВт при  $\eta_r = 0,9$ ;  $\eta_m = 0,8$ ;  $\eta_v = 0,9$ ;  $\eta_t = 0,6$ . Полученную потребляемую мощность увеличиваем в 4 раза (спутник имеет четыре антенны) и получаем  $P_{\text{потр}} = 4$  кВт.

Общая потребляемая мощность на борту КА  $P_{\text{потр}\Sigma} = 4,3$  кВт, здесь также учитывается мощность 140 Вт, которая необходима компьютеру на борту КА.

Расчет площади солнечных батарей проводится в предположении, что КПД преобразователей составляет 30,7 % [52]; удельная

масса солнечных батарей  $1,6 \text{ кг/м}^2$ . При расчете принимаем:  $N_{\text{потр}} = 4300 \text{ Вт}$ ;  $\eta = 30,7 \%$ ;  $r^{-2} = 1$ ;  $q_c = 1366 \text{ Вт/м}^2$ ;  $F_{\text{сб}} = 0,9$ ;  $\cos(\Gamma) = 1$ ,  $\cos(\Gamma)$  принимаем за 1, так как батареи являются автоматически ориентируемыми на Солнце. Подставив значения в формулу (15), получим  $S_{\text{сб}} = 12,7 \text{ м}^2$ .

Общую массу отдельных элементов определим через удельную массу солнечных батарей:  $M_{\text{ФЭП}} = 12,7 \cdot 1,6 = 20,32 \text{ кг}$ . Используя формулы (16)–(18), получим:  $\gamma_{\text{кон}} = 0,925 \cdot M_{\text{ФЭП}} = 18,8 \text{ кг}$ ,  $\gamma_{\text{мех}} = 11,2 \text{ кг}$ ,  $M_{\text{с.б}} = 50,4 \text{ кг}$ .

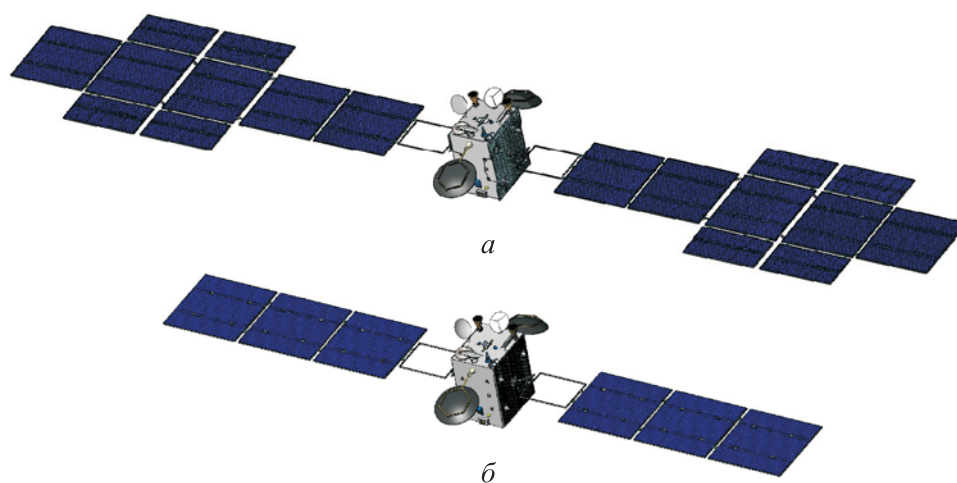
По предложенной методике [49] с применением представленных формул (19)–(23) определим массу спутника. В качестве топлива на аппарате выбран гидразин с удельным импульсом  $J = 2255 \text{ м/с}$ . Запас характеристической скорости для выполнения маневров  $V = 1135 \text{ м/с}$ . При проведении расчетов принимаем следующие значения коэффициентов:  $\gamma_{\text{ДУ}} = 0,01$ ;  $\gamma_{\text{б}} = 0,1$ ;  $\gamma_{\text{к}} = 0,1$ ;  $\gamma_{\text{СТР}} = 0,03$ ;  $\gamma_{\text{БКС}} = 0,03$ .

Массу приборов системы управления и систем бортовых измерений принимаем за  $50 \text{ кг}$ , следовательно,  $\gamma_{\text{т.м}} + \gamma_{\text{СУ}} = \frac{50}{M_{\text{КА}}}$ ,

$\gamma_{\text{СЭО}} = \frac{M_{\text{с.б}} + M_{\text{аккумулятор}}}{M_{\text{КА}}}$ , а массу полезной нагрузки принимаем равной  $60 \text{ кг}$ . Масса аккумулятора  $M_{\text{аккумулятор}} = 8,5 \text{ кг}$  используется при выводе спутника на рабочую орбиту. В результате получим массу КА  $M_{\text{КА}} = 573 \text{ кг}$  и массу топлива  $M_{\text{т}} = 227 \text{ кг}$ .

**Облик КА.** Корпус спутника связи может быть выполнен по традиционной схеме в форме параллелепипеда размерами  $0,98 \times 0,7 \times 1,135 \text{ м}$ . На борту спутника установлен подключенный к сети Ethereum компьютер, энергопотребление которого составляет  $140 \text{ Вт}$ , его масса равна  $56 \text{ кг}$ . На спутнике установлены четыре двигателя тягой  $1 \text{ Н}$  для коррекции рабочей орбиты, а также для увода аппарата на орбиту захоронения высотой  $400 \text{ км}$  после окончания срока эксплуатации. В качестве топлива нужно использовать гидразин. На КА установлены две антенны диаметром  $0,7 \text{ м}$  для связи с наземными станциями и четыре антенны диаметром  $0,32 \text{ м}$  для связи между соседними спутниками данной группировки.

На компоновку спутника существенно влияет площадь панелей солнечных батарей. На рис. 3 показаны спутники для двух рассмотренных вариантов: первый — для группировки из 45 спутников имеет площадь панелей  $28,2 \text{ м}^2$ , а второй — для группировки из 91 спутника с площадью панелей уже  $12,7 \text{ м}^2$ , что существенно упрощает компоновку.



**Рис. 3.** Возможный облик КА IoT 5G:  
а — первый вариант; б — второй вариант

**Заключение.** Разработанная методика оценки проектных параметров спутниковой группировки, работающей по принципу «интернет вещей», позволяет определить влияние на общие проектные параметры группировки характеристик технологии 5G, используемой для передачи данных между КА, а также для связи КА с наземными станциями.

В результате проведенного исследования показано, что верхним ограничением выбора частоты передачи сигналов со спутника на Землю является энергопотребление КА, а нижним — скорость передачи данных и уровень сигнала. Следует также учитывать коэффициент усиления антенн, который зависит от частоты передачи сигналов и имеет ограничения.

В рассмотренном примере при построении спутниковой группировки связи со скоростью передачи данных между спутниками, равной 24 Гбит/с (размер передаваемого информационного пакета не превышает 1 Мбайт, время передачи — не более 1 с), на круговых орбитах высотой 1000 км для обеспечения полного покрытия земной поверхности группировка должна содержать не менее 45 космических аппаратов. При рассмотрении варианта с частотами 23 ГГц и 6 ГГц для передачи сигналов между спутниками и на Землю соответственно необходима бортовая мощность системы электропитания КА, составляющая 11 кВт, для чего потребуется площадь солнечных батарей 28,2 м<sup>2</sup>.

Масса одного космического аппарата составит 780,4 кг, из которых на массу солнечных батарей придется 111,7 кг. Один из способов уменьшить потребляемую мощность, а следовательно, и площадь



солнечных батарей — сократить расстояния между спутниками. Однако это приведет к увеличению числа спутников в группировке. Так, если число спутников в группировке увеличивается до 91 КА (при рассмотрении варианта с частотами 24 ГГц и 4,85 ГГц для передачи сигналов между спутниками и на Землю соответственно), то мощность бортовой системы электропитания уменьшается до 4,3 кВт. Масса одного космического аппарата уменьшится в 1,4 раза и составит 573 кг, из которых на массу солнечных батарей придется 50,4 кг (площадь панелей солнечных батарей — 12,7 м<sup>2</sup>). Хотя масса одного КА во втором случае уменьшается в 1,4 раза, суммарная масса группировки вследствие увеличения числа спутников возрастает с 35 118 кг до 52 143 кг, т. е. практически в 1,5 раза, что потенциально повышает общую стоимость проекта. Однако увеличение числа спутников может быть оправдано с точки зрения повышения надежности радиосвязи с наземными станциями. Для совершенствования методики требуется ее дополнение технико-экономическими моделями.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Oztemel E., Gursev S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020, vol. 31, pp. 127–182. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- [2] Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva, World Economic Forum, 2016, 172 p. URL: [https://law.unimelb.edu.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/3385454/Schwab-The\\_Fourth\\_Industrial\\_Revolution\\_Klaus\\_S.pdf](https://law.unimelb.edu.au/_data/assets/pdf_file/0005/3385454/Schwab-The_Fourth_Industrial_Revolution_Klaus_S.pdf) (дата обращения 12.10.2022).
- [3] Riedl M., Zipper H., Meier M., Diedrich C. Cyber-physical systems alter automation architectures. *Annual Reviews in Control*, 2014, vol. 38 (1). URL: [https://www.researchgate.net/publication/261717202\\_Cyber-physical\\_systems\\_alter\\_automation\\_architectures](https://www.researchgate.net/publication/261717202_Cyber-physical_systems_alter_automation_architectures) (дата обращения 15.10.2022).
- [4] Rosas J., Aguilar J.A., Tripp-Barba C., Espinosa R., Aguilar P. A mobile-sensor fire prevention system based on the Internet of Things. *Computational Science and Its Applications — ICCSA 2017*, 2017, vol. 10409, pp. 274–283. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62407-5\\_19](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62407-5_19) (дата обращения 17.10.2022).
- [5] Смышляева А.А., Резникова К.М., Савченко Д.В. Современные технологии в Индустрии 4.0 — киберфизические системы. *Интернет-журнал «Отходы и ресурсы»*, 2020, № 3. DOI: 10.15862/02INOR320 URL: <https://resources.today/PDF/02INOR320.pdf>. (дата обращения 17.10.2022).
- [6] Al-Ali A.R., Gupta R., Nabulsi A.A. *Cyber physical systems role in manufacturing technologies*, 2018. URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5034337> (дата обращения 17.10.2022).
- [7] Nuñez D., Fernández G., Luna J. Cloud system. *Procedia Computer Engineering*, 2017, vol. 62, pp. 149–164.
- [8] Biral A., Centenaro M., Zanella A., Vangelista, L., Zorzi M. The challenges of M2M massive access in wireless cellular networks. *Digital Communications and Networks*, 2015, vol. 1 (1), pp. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2015.02.001>
- [9] Acharjya D.P., Geetha M.K. *Internet of Things: Novel Advances and Envisioned Applications*. Springer, 2017, 311 p.

- [10] Промышленный интернет вещей. *Агентство промышленного развития Москвы*. URL: <https://apr.moscow/content/data/5/03%20Промышленный%20интернет%20вещей.pdf> (дата обращения 15.10.2022).
- [11] *Рекомендации МСЭ-Т У.2060. Обзор интернета вещей*. URL: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11559> (дата обращения 5.10.2022).
- [12] Что такое ИОТ. *Блог компании OTUS*. URL: <https://habr.com/ru/company/otus/blog/549550/> (дата обращения 02.10.2022).
- [13] *4 IOT connectivity challenges and strategies to tackle them*. URL: <https://www.techtarget.com/iotagenda/feature/4-IoT-connectivity-challenges-and-strategies-to-tackle-them> (дата обращения 12.10.2022).
- [14] *Сети 5G в России — технология и ее внедрение*. URL: <https://5g-russia.ru/> (дата обращения 12.11.2022).
- [15] *Что такое 5G*. URL: <https://media.mts.ru/internet/196902-chto-takoe-5g/> (дата обращения 12.11.2022).
- [16] *Частоты для 5G в России*. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Частоты\\_для\\_5G\\_в\\_России](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Частоты_для_5G_в_России) (дата обращения 12.11.2022).
- [17] *Частота 5G сетей в России и в мире — все диапазоны*. URL: <https://5g-russia.ru/chastota-5g-setej-v-rossii-i-v-mire-vse-diapazonny> (дата обращения 12.11.2022).
- [18] Soret B., Leyva-Mayorga I., Röper M., Wübben D., Matthiesen B., Dekorsy A., Popovski P. LEO Small-Satellite Constellations for 5G and Beyond-5G Communications. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 184955–184964. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029620
- [19] Kua J., Loke S.W., Arora C., Fernando N., Ranaweera C. Internet of Things in Space: A Review of Opportunities and Challenges from Satellite-Aided Computing to Digitally-Enhanced Space Living. *Sensors*, 2021, vol. 21 (23), art. ID 8117. <https://doi.org/10.3390/s21238117>
- [20] Shicong L., Zhen G., Yongpeng W., Derrick Wing Kwan N., Xiqi G., Kai-Kit W., Chatzinotas S., Ottersten B. *LEO Satellite Constellations for 5G and Beyond: How Will They Reshape Vertical Domains*, 2021. URL: [https://www.researchgate.net/publication/352559606\\_LEO\\_Satellite\\_Constellations\\_for\\_5G\\_and\\_Beyond\\_How\\_Will\\_They\\_Reshape\\_Vertical\\_Domains](https://www.researchgate.net/publication/352559606_LEO_Satellite_Constellations_for_5G_and_Beyond_How_Will_They_Reshape_Vertical_Domains) (дата обращения 21.05.2023).
- [21] Leyva-Mayorga I., Soret B., Roper M., Wubben D., Matthiesen B., Dekorsy F., Popovski P. LEO Small-Satellite Constellations for 5G and Beyond-5G Communications. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 184955–184964. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029620. *IEEE Xplore* URL: <https://ieeexplore.ieee.org> (дата обращения 20.09.2022).
- [22] Fei Q., Wenjing L., Yu P., Feng L., Fanqin Z. Shape adaptive IRS based SAG IoT network. DOI: 10.1186/s13638-021-02069-0 URL: [https://www.researchgate.net/publication/356785404\\_Shape\\_adaptive\\_IRS\\_based\\_SAG\\_IoT\\_network](https://www.researchgate.net/publication/356785404_Shape_adaptive_IRS_based_SAG_IoT_network) (дата обращения 21.05.2023).
- [23] Chien W.C., Lai C. F., Hossain M.S., Muhammad G. Heterogeneous Space and Terrestrial Integrated Networks for IoT: Architecture and Challenges. *IEEE Network*, 2019, vol. 33, no. 1, pp. 15–21. DOI: 10.1109/MNET.2018.1800182 *IEEE Xplore* URL: <https://ieeexplore.ieee.org> (дата обращения 20.05.2023).
- [24] Sanchez-Iborra R., Dolores Cano M. State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services. *Sensors*, 2016, vol. 16 (5). URL: [https://www.researchgate.net/publication/303278583\\_State\\_of\\_the\\_art\\_in\\_LP-WAN\\_solutions\\_for\\_industrial\\_IoT\\_services](https://www.researchgate.net/publication/303278583_State_of_the_art_in_LP-WAN_solutions_for_industrial_IoT_services) (дата обращения 21.05.2023).
- [25] *LoRa Alliance*. URL: <https://loro-alliance.org/> (дата обращения 21.05.2023).

- [26] Zizung Y., Walter F., Klaus B. Design and Implementation of a Narrow-Band Intersatellite Network with Limited Onboard Resources for IoT. *Sensors*, 2019, vol. 19. URL: [https://www.researchgate.net/publication/336112890\\_Design\\_and\\_Implementation\\_of\\_a\\_Narrow-Band\\_Intersatellite\\_Network\\_with\\_Limited\\_Onboard\\_Resources\\_for\\_IoT](https://www.researchgate.net/publication/336112890_Design_and_Implementation_of_a_Narrow-Band_Intersatellite_Network_with_Limited_Onboard_Resources_for_IoT) (дата обращения 05.05.2023).
- [27] Нгуен дык ань. *Исследование технологий в наземных сетях LPWAN и их адаптация для использования в спутниковых низкоорбитальных системах с целевой функцией интернета вещей: Дис. ... канд. техн. наук.* Москва, 2022, 109 с.
- [28] *Starlink & IoT: analyzing SpaceX's acquisition of Swarm Technologies*. URL: <https://starlinkinsider.com/starlink-iot/> (дата обращения 22.05.2023).
- [29] *SpaceX enters the IoT connectivity market with Swarm acquisition*. URL: <https://www.edgeir.com/spacex-enters-the-iot-connectivity-market-with-swarm-acquisition-20210824> (дата обращения 21.05.2023).
- [30] *SpaceX launches world's 1st 5G satellite to bring global connectivity to Internet of things*. URL: <https://www.space.com/spacex-launches-1st-5g-satellite-internet-of-things> (дата обращения 22.05.2023).
- [31] *Satellite Constellations — NewSpace Index*. URL: <https://www.newspace.im/> (дата обращения 22.05.2023).
- [32] Information on spaceflight, launch vehicles and satellites. *Gunter's Space Page* URL: <https://space.skyrocket.de/> (дата обращения 22.05.2023).
- [33] Bordalo Monteiro J., Santos J., Antunes P., Guerman A., Jorge F. *A review of small satellite constellations for IoT connectivity*, 2022. URL: [https://www.researchgate.net/publication/364213241\\_A\\_review\\_of\\_small\\_satellite\\_constellations\\_for\\_IoT\\_connectivity](https://www.researchgate.net/publication/364213241_A_review_of_small_satellite_constellations_for_IoT_connectivity) (дата обращения 04.05.2023).
- [34] Проект «Сфера» переходит к практической реализации. *Роскосмос*. URL: <https://www.roskosmos.ru/33771/> (дата обращения 22.05.2023).
- [35] Космический мегабит по земной цене. *Роскосмос*. URL: <https://www.roskosmos.ru/38467/#:~:text=«Скиф»%20—%20спутниковая%20группировка%2C%20предназначенная,передвигающиеся%20по%20Северному%20морскому%20пути> (дата обращения 20.05.2023).
- [36] *Низкоорбитальная многоспутниковая система передачи данных «Марафон IoT»*. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1684590672&tld=ru&lang=ru&name=Marathon-IOT-2-Nov-02.11.2020.pdf> (дата обращения 20.05.2023).
- [37] ИСС Решетнёва готовится к «Сфере». *Роскосмос*. URL: <https://www.roskosmos.ru/32331/> (дата обращения 21.05.2023).
- [38] ТУСУР включился в работу над спутниками для развития интернета вещей. URL: <https://tusus.ru/ru/novosti-i-meropriyatiya/novosti/prosmotr/-/novost-tusus-vklyuchilsya-v-rabotu-nad-sputnikami-dlya-razvitiya-interneta-veschey> (дата обращения 21.05.2023).
- [39] *Интернет вещей из космоса*. URL: <https://rspectr.com/articles/internet-veshhej-iz-kosmosa> (дата обращения 21.05.2023).
- [40] Narayanasamy A., Yasser A., Othman M. *Nanosatellites constellation as an IoT communication platform for near equatorial countries*, 2017. URL: [https://www.researchgate.net/publication/320915539\\_Nanosatellites\\_constellation\\_as\\_an\\_IoT\\_communication\\_platform\\_for\\_near\\_equatorial\\_countries](https://www.researchgate.net/publication/320915539_Nanosatellites_constellation_as_an_IoT_communication_platform_for_near_equatorial_countries) (дата обращения 05.05.2023).
- [41] *Link budget*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Link\\_budget](https://en.wikipedia.org/wiki/Link_budget) (дата обращения 10.12.2022).
- [42] *Распространение радиоволн*. URL: [https://wl.unn.ru/materials/courses/wlnet/Lect/2\\_Lect\\_1\\_2.pdf](https://wl.unn.ru/materials/courses/wlnet/Lect/2_Lect_1_2.pdf) (дата обращения 27.03.2023).

- [43] Дубровин В.С., Колесникова И.В. К расчету параболической антенны для сверхширокополосных систем радиодоступа. *Электроника и информационные технологии*, 2009, № 2 (7), с. 19–29.
- [44] *Радиотехника: от истоков до наших дней*. URL: [https://studref.com/674340/tehnika/radiosvyaz\\_dalnim\\_kosmosom](https://studref.com/674340/tehnika/radiosvyaz_dalnim_kosmosom) (дата обращения 04.12.2022).
- [45] *Коэффициент усиления и чувствительность*. URL: <https://helpiks.org/7-89097.html> (дата обращения 06.12.2022).
- [46] *Мощность сигнала и радиус работы*. URL: <https://urouter.ru/how-it-works/signal-strength-and-range.html> (дата обращения 04.12.2022).
- [47] *Предварительный расчет РПУ. Расчет требуемой импульсной мощности РПУ и коэффициента усиления антенны*. URL: [https://studbooks.net/2371019/tehnika/predvaritelnyu\\_raschet\\_raschet\\_trebuemoj\\_impulsnoy\\_moschnosti\\_koeffitsienta\\_usileniya\\_antenny](https://studbooks.net/2371019/tehnika/predvaritelnyu_raschet_raschet_trebuemoj_impulsnoy_moschnosti_koeffitsienta_usileniya_antenny) (дата обращения 10.12.2022).
- [48] Туманов А.В., Зеленцов В.В., Щеглов Г.А. *Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 572 с.
- [49] Зеленцов В.В., Казаковцев В.П. *Основы баллистического проектирования искусственных спутников Земли*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012, 174 с.
- [50] Беляев А.В., Зеленцов В.В., Щеглов Г.А. *Средства выведения космических летательных аппаратов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007, 56 с.
- [51] *Методы передачи данных на физическом уровне информации*. URL: <https://studfile.net/preview/4034108/page:5/> (дата обращения 11.03.2023).
- [52] *Spectrolab*. URL: <https://www.spectrolab.com/photovoltaics.html> (дата обращения 07.12.2022).

Статья поступила в редакцию 06.06.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Щеглов Г.А., Таратонкина В.С. Технологии применения распределенных вычислений при построении перспективных сбое- и отказоустойчивых орбитальных группировок малых космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-7-2289>

**Щеглов Георгий Александрович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Таратонкина Вера Сергеевна** — студент 5-го курса кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [taratonkinavs@student.bmstu.ru](mailto:taratonkinavs@student.bmstu.ru)

## Design parameters evaluation of the IoT 5G information satellites constellation

© G.A. Shcheglov, V.S. Taratonkina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The paper presents technique for evaluating design parameters of a satellite constellation operating on the Internet-of-Things principle and making it possible to determine the impact on the constellation general design parameters on characteristics of the fifth generation 5G communication technology used in data transmission between spacecraft, as well as in communication between a spacecraft and the ground stations. Examples of the satellite communication constellation with the data transfer rate of 24 Gbit/s operating in circular orbits with the height of 1000 km are considered. It is shown that the upper limiting parameter for selecting the signal transmission frequency from the satellite to the Earth is the spacecraft power consumption, and the lower limits are the data transfer rate and the signal level. Besides, it is necessary to consider the antenna gain, which depends on the signal transmission frequency and has limitations. Results of studying dependence of the distance between the satellites in the Earth orbit constellation on the power consumed on board the spacecraft are presented. It is shown that with an increase in the number of satellites in constellation and due to a decrease in the onboard equipment power, the mass of a single spacecraft would decrease by 1.4 times. However, total mass of the constellation grows by almost 1.5 times, which potentially increases the project total cost.*

**Keywords:** Internet-of-Things, satellite communication, 5G/6G network

### REFERENCES

- [1] Oztemel E., Gursev S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020, vol. 31, pp. 127–182. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- [2] Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva, World Economic Forum, 2016, 172 p.  
URL: [https://law.unimelb.edu.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/3385454/Schwab-The\\_Fourth\\_Industrial\\_Revolution\\_Klaus\\_S.pdf](https://law.unimelb.edu.au/_data/assets/pdf_file/0005/3385454/Schwab-The_Fourth_Industrial_Revolution_Klaus_S.pdf) (accessed October 12, 2022).
- [3] Riedl M., Zipper H., Meier M., Diedrich C. Cyber-physical systems alter automation architectures. *Annual Reviews in Control*, 2014, vol. 38 (1). Available at: [https://www.researchgate.net/publication/261717202\\_Cyber-physical\\_systems\\_alter\\_automation\\_architectures](https://www.researchgate.net/publication/261717202_Cyber-physical_systems_alter_automation_architectures) (accessed October 15, 2022).
- [4] Rosas J., Aguilar J. A., Tripp-Barba C., Espinosa R., Aguilar P. A mobile-sensor fire prevention system based on the internet of things. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2017*, 2017, vol. 10409, pp. 274–283. Available at: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62407-5\\_19](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62407-5_19) (accessed October 17, 2022).
- [5] Smyshlyaeva A.A., Reznikova K.M., Savchenko D.V. Modern technologies in Industry 4.0 — cyber-physical systems. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 2020, no. 3, vol. 7. DOI: 10.15862/02INOR320 Available at: <https://resources.today/PDF/02INOR320.pdf> (in Russian). (accessed October 17, 2022).

- [6] Al-Ali A.R., Gupta R., Nabulsi A.A. *Cyber physical systems role in manufacturing technologies*, 2018. Available at: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5034337> (accessed October 17, 2022).
- [7] Nuñez D., Fernández G., Luna J. Cloud system. *Procedia Computer Engineering*, 2017, vol. 62, pp. 149–164.
- [8] Biral A., Centenaro M., Zanella A., Vangelista L., Zorzi M. The challenges of M2M massive access in wireless cellular networks. *Digital Communications and Networks*, 2015, vol. 1 (1). Available at: [https://www.researchgate.net/publication/274096594\\_The\\_challenges\\_of\\_M2M\\_massive\\_access\\_in\\_wireless\\_cellular\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/274096594_The_challenges_of_M2M_massive_access_in_wireless_cellular_networks) (accessed October 25, 2022).
- [9] Acharjya D.P., Geetha M.K. *Internet of Things: Novel Advances and Envisioned Applications*. Springer, 2017, 311 p. (accessed October 2, 2022).
- [10] *Agentstvo promyshlennogo razvitiya Moskvy. Promyshlenniy internet veschey* [Moscow Industrial Development Agency. Industrial Internet-of-Things]. Available at: <https://apr.moscow/content/data/5/03%20Промышленный%20интернет%20вещей.pdf> (accessed October 15, 2022).
- [11] *Rekomendatsii MSE-T Y.2060. Obzor interneta veschey* [ITU-T Y.2060 Recommendations. Overview of the Internet-of-Things]. Available at: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11559> (accessed October 05, 2022).
- [12] Chto takoe IOT. *Blog kompanii OTUS* [What is IOT. OTUS blog]. Available at: <https://habr.com/ru/company/otus/blog/549550/> (accessed October 2, 2022).
- [13] *4 IOT connectivity challenges and strategies to tackle them*. Available at: <https://www.techtarget.com/iotagenda/feature/4-IoT-connectivity-challenges-and-strategies-to-tackle-them> (accessed October 12, 2022).
- [14] *Seti 5G v Rossii — tekhnologiya i ee vnedrenie* [5G networks in Russia – technology and its implementation]. Available at: <https://5g-russia.ru/> (accessed November 12, 2022).
- [15] *Chto takoe 5G* [What is 5G]. Available at: <https://media.mts.ru/internet/196902-chto-takoe-5g/> (accessed November 12, 2022).
- [16] *Chastoty dlya 5G v Rossii* [Frequencies for 5G in Russia]. Available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Частоты\\_для\\_5G\\_в\\_России](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Частоты_для_5G_в_России) (accessed November 12, 2022).
- [17] *Chastota 5G setey v Rossii i v mire — vse diapazonny* [The 5G frequency networks in Russia and in the world — all ranges]. Available at: <https://5g-russia.ru/chastota-5g-setej-v-rossii-i-v-mire-vse-diapazonny> (accessed November 12, 2022).
- [18] Soret B., Leyva-Mayorga I., Röper M., Wübben D., Matthiesen B., Dekorsy A., Popovski P. LEO Small-Satellite Constellations for 5G and Beyond-5G Communications. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 184955–184964. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029620
- [19] Kua J., Loke S.W., Arora C., Fernando N., Ranaweera C. Internet of Things in Space: A Review of Opportunities and Challenges from Satellite-Aided Computing to Digitally-Enhanced Space Living. *Sensors*, 2021, vol. 21 (23), art. ID 8117. <https://doi.org/10.3390/s21238117>.
- [20] Shicong L., Zhen G., Yongpeng W., Derrick Wing Kwan N., Xiqi G., Kai-Kit W., Chatzinotas S., Ottersten B. *LEO Satellite Constellations for 5G and Beyond: How will they reshape vertical domains*, 2021. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/352559606\\_LEO\\_Satellite\\_Constellations\\_for\\_5G\\_and\\_Beyond\\_How\\_Will\\_They\\_Reshape\\_Vertical\\_Domains](https://www.researchgate.net/publication/352559606_LEO_Satellite_Constellations_for_5G_and_Beyond_How_Will_They_Reshape_Vertical_Domains) (accessed May 21, 2023).

- [21] Leyva-Mayorga I., Soret B., Roper M., Wubben D., Matthiesen B., Dekorsy F., Popovski P. LEO Small-Satellite Constellations for 5G and Beyond-5G Communications. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 184955–184964. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029620> *IEEE Xplore*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org> (accessed September 20, 2022).
- [22] Fei Q., Wenjing L., Yu P., Feng L., Fanqin Z. *Shape adaptive IRS based SAG IoT network*. <https://doi.org/10.1186/s13638-021-02069-0> Available at: [https://www.researchgate.net/publication/356785404\\_Shape\\_adaptive\\_IRS\\_based\\_SAG\\_IoT\\_network](https://www.researchgate.net/publication/356785404_Shape_adaptive_IRS_based_SAG_IoT_network). (accessed May 21, 2023).
- [23] Chien W.C., Lai C. F., Hossain M.S., Muhammad G. Heterogeneous Space and Terrestrial Integrated Networks for IoT: Architecture and Challenges. *IEEE Network*, 2019, vol. 33, no. 1, pp. 15–21. <https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1800182> *IEEE Xplore*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org>. (accessed May 20, 2023).
- [24] Sanchez-Iborra R., Dolores Cano M. State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services. *Sensors*, 2016, vol. 16 (5). Available at: [https://www.researchgate.net/publication/303278583\\_State\\_of\\_the\\_art\\_in\\_LP-WAN\\_solutions\\_for\\_industrial\\_IoT\\_services](https://www.researchgate.net/publication/303278583_State_of_the_art_in_LP-WAN_solutions_for_industrial_IoT_services) (accessed May 21, 2023).
- [25] *LoRa Alliance*. Available at: <https://lora-alliance.org/> (accessed May 21, 2023).
- [26] Zizung Y., Walter F., Klaus B. Design and implementation of a narrow-band intersatellite network with limited onboard resources for IoT. *Sensors*, 2019, vol. 19. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/336112890\\_Design\\_and\\_Implementation\\_of\\_a\\_Narrow-Band\\_Intersatellite\\_Network\\_with\\_Limited\\_Onboard\\_Resources\\_for\\_IoT](https://www.researchgate.net/publication/336112890_Design_and_Implementation_of_a_Narrow-Band_Intersatellite_Network_with_Limited_Onboard_Resources_for_IoT) (accessed May 5, 2023).
- [27] Nguyen Duc Anh. *Issledovanie tekhnologiy v nazemnykh setyakh LPWAN i ikh adaptatsiya dlya ispolzovaniya v sputnikovykh nizkoorbitalnykh sistemakh s tselevoy funktsiey interneta veshey. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Research of technologies in the land-based WAN networks and their adaptation for use in the satellite low-orbit systems with the Internet-of-Things target function. Diss. ... Cand. Sc. (Eng.)]. Moscow, 2022, 109 p.
- [28] *Starlink & IoT: analyzing SpaceX's acquisition of Swarm Technologies*. Available at: <https://starlinkinsider.com/starlink-iot/> (accessed May 22, 2023).
- [29] *SpaceX enters the IoT connectivity market with Swarm acquisition*. Available at: <https://www.edgeir.com/spacex-enters-the-iot-connectivity-market-with-swarm-acquisition-20210824> (accessed May 21, 2023).
- [30] *SpaceX launches world's 1<sup>st</sup> 5G satellite to bring global connectivity to Internet of things*. Available at: <https://www.space.com/spacex-launches-1st-5g-satellite-internet-of-things> (accessed May 22, 2023).
- [31] Satellite Constellations. *NewSpace Index*. Available at: <https://www.newspace.im/> (accessed May 22, 2023).
- [32] Information on spaceflight, launch vehicles and satellites. *Gunter's Space Page*. Available at: <https://space.skyrocket.de/> (accessed May 22, 2023).
- [33] Bordalo Monteiro J., Santos J., Antunes P., Guerman A., Jorge F. *A review of small satellite constellations for IoT connectivity*, 2022. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/364213241\\_A\\_review\\_of\\_small\\_satellite\\_constellations\\_for\\_IoT\\_connectivity](https://www.researchgate.net/publication/364213241_A_review_of_small_satellite_constellations_for_IoT_connectivity) (accessed May 04, 2023).
- [34] Proekt “Sfera” perekhodit k prakticheskoy realizatsii [The Sphere project is moving to practical implementation]. *Roscosmos*. Available at: <https://www.roscosmos.ru/33771/> (accessed May 22, 2023).
- [35] Kosmicheskiy megabit po zemnoy tsene [Space megabit at the Earth price]. *Roscosmos*. Available at:

- <https://www.roscosmos.ru/38467/#:~:text=«Скиф»%20—%20спутниковая%20группировка%2C%20предназначенная,передвигающ иеся%20по%20Северному%20морскому%20пути> (accessed May 20, 2023).
- [36] *Nizkoorbitalnaya mnogospunikovaya sistema peredachi dannykh “Marafon IoT”* [Low-orbit multi-satellite data transmission system “Marathon IoT”]. Available at: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1684590672&tld=ru&lang=ru&name=Marathon-IOT-2-Nov-02.11.2020.pdf> (accessed May 20, 2023).
- [37] ISS Reshetneva gotovitsya k “Sfere” [Information Satellite Systems Reshetnev is preparing for the “Sphere”]. *Roscosmos*. Available at: <https://www.roscosmos.ru/32331/> (accessed May 21, 2023).
- [38] *TUSUR vklyuchilsya v rabotu nad sputnikami dlya razvitiya interneta veschey* [Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics joined the work on satellites to development the Internet-of-Things]. Available at: <https://tusur.ru/ru/novosti-i-meropriyatya/novosti/prosmotr/-/novost-tusur-vklyuchilsya-v-rabotu-nad-sputnikami-dlya-razvitiya-interneta-veschey> (accessed May 21, 2023).
- [39] *Internet veschey iz kosmosa* [Internet-of-Things from the outer space]. Available at: <https://rspectr.com/articles/internet-veshhej-iz-kosmosa> (accessed May 21, 2023).
- [40] Narayanasamy A., Yasser A., Othman M. *Nanosatellites constellation as an IoT communication platform for near equatorial countries*, 2017. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/320915539\\_Nanosatellites\\_constellation\\_on\\_as\\_an\\_IoT\\_communication\\_platform\\_for\\_near\\_equatorial\\_countries](https://www.researchgate.net/publication/320915539_Nanosatellites_constellation_on_as_an_IoT_communication_platform_for_near_equatorial_countries) (accessed May 5, 2023).
- [41] *Link budget*. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Link\\_budget](https://en.wikipedia.org/wiki/Link_budget) (accessed December 10, 2022).
- [42] *Rasprostranenie radiovoln* [Radio waves propagation]. Available at: [https://wl.unn.ru/materials/courses/wlnet/Lect/2\\_Lect\\_1\\_2.pdf](https://wl.unn.ru/materials/courses/wlnet/Lect/2_Lect_1_2.pdf) (accessed March 27, 2023).
- [43] Dubrovin V.S., Kolesnikova I.V. K raschetu parabolicheskoy anteny dlya sverkhshirokopolosnykh sistem radiodistupa [On calculation of the parabolic antenna for ultra-wideband radio access systems]. *Elektronika i informatsionnye tekhnologii — Electronics and Information Technologies*, 2009, no. 2 (7), pp. 19–29.
- [44] *Radiotekhnika: ot istokov do nashikh dney* [Radio engineering: from the origins to the present day]. Available at: [https://studref.com/674340/tehnika/radiosvyaz\\_dalnim\\_kosmosom](https://studref.com/674340/tehnika/radiosvyaz_dalnim_kosmosom) (accessed December 4, 2022).
- [45] *Koeffitsient usileniya i chustvitel'nost* [Gain and sensitivity]. Available at: <https://helpiks.org/7-89097.html> (accessed December 6, 2022).
- [46] *Moschnost signala i radius raboty* [Signal strength and range]. Available at: <https://urouter.ru/how-it-works/signal-strength-and-range.html> (accessed December 4, 2022).
- [47] *Predvaritelnyi raschet RPU. Raschet trebuemoy impulsnoy moschnosti RPU i koeffitsienta usileniya anteny* [Radio receiver preliminary calculation. Radio receiver required pulse power and antenna gain calculation]. Available at: [https://studbooks.net/2371019/tehnika/predvaritelnyy\\_raschet\\_raschet\\_trebuemoy\\_impulsnoy\\_moschnosti\\_koeffitsienta\\_usileniya\\_anteny](https://studbooks.net/2371019/tehnika/predvaritelnyy_raschet_raschet_trebuemoy_impulsnoy_moschnosti_koeffitsienta_usileniya_anteny) (accessed December 10, 2022).
- [48] Tumanov A.V., Zelentsov V.V., Shcheglov G.A. *Osnovy komponovki bortovogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov* [Fundamentals of layout of the spacecraft onboard equipment]. Moscow, BMSTU Publ., 2018, 572 p.



- [49] Zelentsov V.V., Kazakovtsev V.P. *Osnovy ballisticheskogo proektirovaniya iskusstvennykh sputnikov Zemli* [Fundamentals of ballistic design of the artificial Earth satellites]. Moscow, BMSTU Publ., 2012, 174 p.
- [50] Belyaev A.V., Zelentsov V.V., Shcheglov G.A. *Sredstva vyvedeniya kosmicheskikh letatelnykh apparatov* [Spacecraft launch vehicles]. Moscow, BMSTU Publ., 2007, 56 p.
- [51] *Metody peredachi dannykh na fizicheskom urovne informatsii* [Methods of data transmission at the physical level of information]. Available at: <https://studfile.net/preview/4034108/page:5/> (accessed March 11, 2023).
- [52] *Spectrolab*. Available at: <https://www.spectrolab.com/photovoltaics.html> (accessed December 7, 2022).

**Shcheglov G.A.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University.

**Taratonkina V.S.**, 5th-year Student, Department Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: taratonkinavs@student.bmstu.ru