

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГЛОБАЛЬНОГО ИНТЕРНЕТА

Булушев П.П., Мещеряков И.Ю., Борисов В.В., Тарасов В.Н.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: 230063@edu.psuti.ru, mk88vvv@vk.com, v.borisov@psuti.ru, v.tarasov@psuti.ru

В статье представлен сравнительный обзор современных спутниковых систем глобального доступа в интернет: Starlink, Kuiper, OneWeb, «Бюро 1440» и Guowang. Проанализированы их орбитальные конфигурации, масштаб группировок, показатели задержки сигнала и технические решения, включая межспутниковые лазерные линии связи и 5G NTN. На основе открытых данных определены теоретические значения задержки для геостационарной орбиты, средней орбиты и низкой орбиты Земли, а также выполнен программный расчет площади покрытия отдельного спутника с визуализацией результатов. Показано, что низкоорбитальные системы обеспечивают минимальную задержку ($\approx 10\text{--}40$ мс), но требуют значительно большего числа аппаратов для глобального охвата; среднеорбитальные группировки охватывают большие площади меньшим количеством спутников при задержке порядка 100–150 мс. Проведен сопоставительный анализ стоимости пользовательского оборудования и заявленных тарифов, выявивший потенциал массового рынка для LEO сервисов, несмотря на необходимость регулярного пополнения группировки. Отмечается, что регулирующее содействие государства и особенно государственные партнерства ускоряют развертывание проектов, однако основные инвестиционные риски несут коммерческие компании.

Ключевые слова: спутниковый интернет, низкая околоземная орбита, геостационарная орбита, средняя околоземная орбита, цифровой суверенитет, лазерная межспутниковая связь, 5G NTN, IoT, глобальное покрытие, задержка сигнала, космическая группировка

Введение

В последние десятилетия спутниковые технологии играют важную роль в обеспечении глобальной связи, открывая новые горизонты для высокоскоростного интернета и улучшения качества связи в удаленных и труднодоступных районах. Проблема доступа к интернету в таких регионах, где традиционные способы подключения неэффективны или экономически нецелесообразны, становится все более актуальной. Спутниковые системы предлагают решение, позволяющее обеспечить связью самые отдаленные уголки Земли.

По мере развития технологий и наряду с запуском различных проектов, таких как Starlink, OneWeb, Iridium и другие, спутниковые сети становятся все более доступными [1] для массового пользователя. Каждая из этих систем имеет свои особенности, применяемые технологии и способы обеспечения надежности связи. Например, различные орбитальные конфигурации спутников, такие как низкая орбита Земли (LEO), геостационарная орбита (GEO) и средняя орбита (MEO), влияют на скорость передачи данных, задержку и доступность интернета [2].

Цель данной статьи – провести сравнительный анализ современных спутниковых систем,

с фокусом на их технологические особенности, производительность, стоимость услуг и возможности для обеспечения глобального интернета. В статье рассматриваются преимущества и недостатки различных проектов, а также их перспективы в контексте развития глобальной инфраструктуры связи. Исследование направлено на определение ключевых факторов, влияющих на выбор спутниковой системы для обеспечения стабильной и доступной связи по всему миру.

Спутниковый интернет – будущее современной связи

Спутниковый интернет представляет собой ключевую составляющую будущей глобальной коммуникационной инфраструктуры. В последние годы спутниковые технологии стремительно развиваются, открывая новые возможности для обеспечения связи в отдаленных и труднодоступных районах, где традиционные способы подключения неэффективны или невозможны. Эта технология позволяет преодолевать географические и экономические барьеры, обеспечивая доступ к интернету для населения в регионах, где провайдеры наземных сетей либо не могут, либо не хотят инвестировать в развитие инфраструктуры. Главное преимущество спутникового интернета заключается в его универсальности и



глобальном охвате. Спутниковые системы могут обеспечить интернет-связь в любой точке планеты, будь то высокие горы, пустыни, океаны или удаленные острова. Для пользователей, живущих в сельской местности, это означает не только доступ к базовым интернет-услугам, но и возможности для онлайн-образования, здравоохранения, торговли и предпринимательства. Вдобавок спутниковая связь позволяет людям и компаниям в таких регионах интегрироваться в глобальные информационные сети, преодолевая цифровое неравенство.

Развитие низкоорбитальных спутниковых сетей, таких как Starlink и OneWeb, стало настоящей революцией в области спутникового интернета. Эти сети используют большое количество спутников, расположенных на низкой орбите Земли (LEO), что значительно снижает задержку сигнала и повышает скорость передачи данных по сравнению с традиционными геостационарными спутниками. Ожидается, что такие сети смогут обеспечить не только качественный доступ к интернету в удаленных уголках мира, но и помогут разгрузить существующие каналы связи, улучшив их пропускную способность.

Таким образом, спутниковый интернет представляет собой не просто технологическое достижение, а важный шаг в сторону повышения качества жизни людей во всем мире, доступности информации и укрепления глобальной коммуникации. В будущем спутниковые сети могут стать основой для создания всеобъемлющей системы связи, охватывающей все уголки Земли и предоставляющей доступ к информации и ресурсам в любое время и в любом месте [3].

Низкая, средняя и высокая орбиты: преимущества и недостатки

Спутниковый интернет – это ключевой инструмент для обеспечения глобальной связи, особенно в удаленных и труднодоступных регионах, где наземная инфраструктура отсутствует или неэффективна. Выбор орбиты для спутников существенно влияет на производительность, стоимость и доступность услуг.

Низкая орбита Земли (LEO): Высота от 160 км до 2 000 км. Спутники на этой орбите совершают один оборот вокруг Земли примерно за 90 минут, что делает их движение относительно быстрым. Примеры включают системы, такие как Starlink и OneWeb, которые используют LEO для обеспечения низкой задержки.

Средняя орбита Земли (MEO): Высота от 2 000 км до 35 786 км. Эта орбита часто использу-

ется для навигационных систем, таких как GPS, с орбитальным периодом в несколько часов. Для интернета MEO менее распространена, но системы, такие как O3b, демонстрируют ее потенциал.

Геостационарная орбита (GEO): ровно 35 786 км над экватором, где спутники вращаются с той же скоростью, что и Земля, и кажутся неподвижными с поверхности. Это традиционная орбита для спутникового интернета, используемая системами, такими как HughesNet и Viasat.

Одна из главных характеристик при выборе орбиты для спутника – это задержка. Используя простую формулу, можно рассчитать, какой будет примерная задержка у спутников на разных орбитах Земли:

$$t = \frac{2h}{c},$$

где t – задержка, с;

h – высота орбиты спутника, м;

c – скорость света, 3×10^8 м/с.

Для Геостационарной орбиты (GEO, 35 786 км) задержка будет около 240 мс, чтобы сигнал прошел от Земли до спутника и обратно.

Для Средней орбиты (MEO, 8 000 км) задержка будет около 53 мс, чтобы сигнал прошел от Земли до спутника и обратно.

Для Низкой орбиты (LEO, 550 км) задержка будет около 3,7 мс, чтобы сигнал прошел от Земли до спутника и обратно.

Кроме того, не стоит забывать, что спутниковые системы часто используют различные технологии для обеспечения связи, такие как многократная маршрутизация, которые могут увеличить время отклика. В реальных условиях для геостационарной орбиты задержка может составлять 500–600 мс, для средней орбиты – 100–150 мс, а для низкой орбиты – 10–20 мс, в зависимости от различных факторов, таких как расстояние до спутника, качество сигнала и нагрузка сети.

Таким образом, хотя теоретическая задержка для геостационарной орбиты составляет около 240 мс, в реальности пользователи могут испытывать большую задержку из-за наличия дополнительных факторов, влияющих на качество связи.

Помимо задержки, важным параметром является площадь покрытия, обеспечиваемая одним спутником, что имеет критическое значение при формировании созвездия для глобального охвата.

Был написан код на Python для расчета площади покрытия спутником площади земли и вывода этих данных на карту мира.

Алгоритм расчета радиуса покрытия спутника и визуализации зоны покрытия: сначала задается радиус Земли R , равный 6371 км, и определяются высоты орбиты спутников различных типов (GEO, MEO, LEO). Для каждого значения высоты h вычисляется центральный угол видимости спутника по формуле:

$$\delta = \arccos\left(\frac{R}{R+h}\right),$$

где R – радиус Земли;

h – высоты орбит спутников.

После чего определяется радиус покрытия на поверхности Земли по формуле:

$$r = R \cdot \delta.$$

Полученные данные значения радиуса покрытия используются для построения кругов на карте мира с центром в точке подспутниковой проекции, при этом для каждого типа орбит выбирается отдельный цвет. В результате формируется карта, на которой наглядно представлены зоны покрытия спутников различных орбитальных систем.

Код вычисляет поверхностный радиус зоны покрытия и возвращает километровый радиус видимости, который используется для построения кругов покрытия спутников на разных орбитах (рисунок 1).

Эти расчеты демонстрируют, что спутники на высоких орбитах способны охватывать значительно большую площадь, что, в свою очередь, позволяет использовать меньшее количество аппаратов для обеспечения глобального покрытия. Однако

преимущество LEO-систем заключается в существенно меньшей задержке сигнала, хотя для полного охвата Земли требуется больше спутников.

Таким образом, выбор орбиты представляет собой компромисс между минимизацией задержки и эффективностью покрытия, что оказывает прямое влияние на стоимость и качество предоставляемых услуг. При современных требованиях к глобальному интернету оптимизация этих параметров становится одним из ключевых факторов, учитываемых при проектировании спутниковых систем.

США: проекты Starlink и Kuiper

Starlink (SpaceX) – это наиболее продвинутая на сегодняшний день система спутникового интернета. Развёртывание началось в 2019 году, и к концу 2021 года SpaceX вывела на орбиту свыше 1700 спутников Starlink [4]. В дальнейшем группировка стремительно растет: Федеральная комиссия по связи США (FCC) одобрила развёртывание ~12 000 аппаратов, а компания подала заявку еще на 30 000 (итого до ~42 тысяч спутников). Спутники Starlink размещаются на низкой околоземной орбите (LEO) высотой ~550 км (несколько «оболочек» с наклонениями ~53° и полярными), что обеспечивает низкую задержку сигнала (~20–40 мс) [5]. На конец 2024 года сеть насчитывала уже несколько тысяч активных спутников и предоставляла услуги в десятках стран мира. Скорость подключения для пользователей достигает 100–200 Мбит/с и выше.

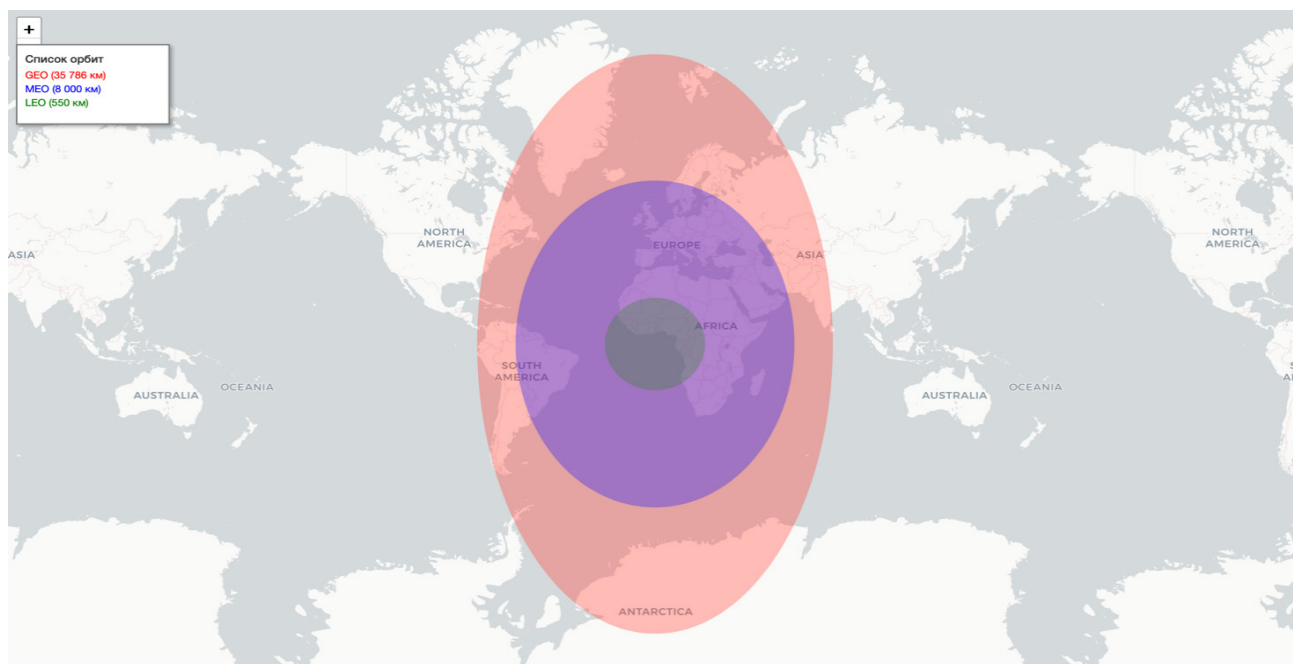


Рисунок 1. Площадь покрытия поверхности Земли различными спутниками

Спутники оснащены передатчиками Ka/Ku-диапазона и новейшими лазерными межспутниковыми линиями связи для прямой ретрансляции трафика в космосе (начиная со спутников v1.5 и v2). Пользовательский терминал Starlink представляет собой плоскую фазированную антенную решетку («тарелку») с автоматическим наведением; терминал массово выпускается и относительно доступен (около \$600 за комплект, абонентская плата составляет ~\$110 в месяц). Проект Starlink инициирован частной компанией SpaceX, однако пользуется поддержкой правительства США в виде регуляторного содействия (выделение частотного ресурса FCC) и контрактов – например, Пентагон и NASA заключают соглашения на предоставление услуг связи Starlink. Неформально Starlink рассматривается как стратегический актив США, что особенно проявилось в условиях конфликтов (например, обеспечение связью Украины в 2022 г.). Тем не менее, управляется Starlink частным образом, и государство выступает скорее партнером и заказчиком услуг, чем прямым оператором.

Project Kuiper (Amazon) – вторая крупная американская инициатива спутникового интернета [6]. Компания Amazon объявила о проекте в 2019 году, планируя создать группировку из 3236 спутников на низкой орбите ~590–630 км. В отличие от Starlink, система Kuiper пока находится на ранней стадии: первые два прототипа спутников были успешно запущены в октябре 2023 г., а массовые запуски начнутся с 2025 г. для предоставления первых услуг к 2026–2027 гг. [6]. Kuiper будет работать в Ka/Ku-диапазонах, обеспечивая широкополосный доступ с высокой пропускной способностью, сопоставимой со Starlink. Заявленные характеристики – низкая задержка (порядка 20–40 мс) и высокие скорости интернет-соединения для конечных пользователей, хотя точные цифры Amazon пока не раскрывает. Орбитальная архитектура предполагает несколько наклонений орбит для глобального покрытия (включая средней широты и полярные районы). Государственная поддержка Kuiper выражается в регулировании (FCC выделила необходимый спектр частот и орбитальный ресурс) и в сотрудничестве с NASA (Amazon планирует использовать ракеты New Glenn от Blue Origin и Atlas V для запусков). Однако финансирование полностью частное – Amazon инвестирует в проект ~\$10 млрд собственных средств. Таким образом, в США модель развития – это кооперация государства и частных гигантов, где бизнес берет на себя основные риски и расходы, а государство

создает благоприятные условия и пользуется результатом (например, подключение отдаленных регионов, укрепление технологического лидерства США).

Россия: программа «Сфера» и проект «Резонанс» и «Бюро 1440»

«Сфера» – это российская федеральная целевая программа создания многоспутниковой группировки связи и наблюдения к 2030 году. Изначально заявлено около 640 спутников различного назначения, с объединением несколько подсистем [7]. Ключевые проекты связи в рамках «Сферы»:

«Скиф» – система широкополосного доступа в интернет. Планируется 12 крупных спутников на средней околоземной орбите ~8070 км (три плоскости по 4 спутника). Это МЕО-группировка, предназначенная обеспечить интернет в труднодоступных районах, прежде всего в Арктике и на Севере России. Первый демонстрационный аппарат «Скиф-Д» запущен в октябре 2022 г. для отработки технологий и «защиты орбитально-частотного ресурса». Спутники «Скиф» будут массивными (до 1,7 т) и оснащены лазерной межспутниковой связью. Задача – обеспечить для потребителя скоростной интернет, сопоставимый по стоимости за 1 Мбит с наземным широкополосным доступом.

«Марафон IoT» – глобальная система связи для Интернета вещей. Предусмотрено 264 небольших спутника на низкой околоземной орбите ~750 км (12 плоскостей). Эти аппараты будут передавать небольшие объемы данных от датчиков и устройств, поддерживая связь IoT по всей планете. Запускаться «Марафоны» будут крупными партиями по 22–44 шт. на ракету. Срок жизни каждого – около 5 лет, после чего планируется их замена. Производство организует ИСС им. Решетнева, планируется поточный выпуск – один спутник каждые ~1,5–2 дня.

«Экспресс-РВ» – новая группировка высокоэллиптических спутников связи (тип орбиты «Молния»). Четыре аппарата на высокоэллиптических орбитах (~40 тыс. км апогей) обеспечат непрерывное покрытие высоких широт России, недоступных с геостационарной орбиты. Запуски намечены на 2025 год. Эти спутники обеспечат широкополосный интернет и связь на Крайнем Севере и в Арктике (например, для морских путей и удаленных поселений).

Геостационарные спутники – программа предусматривает развитие существующих семейств «Экспресс» (спутники Госкомиссии по связи) и «Ямал» (спутники Газпром космические систе-

мы) на GEO для телевизионного вещания и связи. Хотя геостационарный спутниковый интернет традиционно имеет высокую задержку (~600 мс), эти спутники остаются частью комплексной инфраструктуры «Сферы».

Бюро 1440 – это частный российский проект, направленный на развертывание низкоорбитальной группировки спутников для обеспечения высокоскоростного широкополосного доступа в интернет с глобальным покрытием [8]. Система рассчитана на обеспечение связи с низкими задержками и высокими скоростями передачи данных (целевые показатели – до 1 Гбит/с на абонента при задержке ~50–70 мс, тогда как у геостационарных систем задержки >600 мс при скоростях в десятки Мбит/с). Планируемая группировка насчитывает порядка 300 аппаратов на орбитах ~500 км, что должно обеспечить круглосуточное покрытие всей поверхности Земли к 2027 году. К этому времени предполагается начало коммерческой эксплуатации сети, а в дальнейшем возможна ее экспансия – за счет пополнения и замены спутников общее число запущенных аппаратов может достигнуть ~380 к началу 2030-х годов. Таким образом, «Бюро 1440» формирует национальную систему спутникового интернета, сопоставимую по охвату с зарубежными проектами (Starlink, OneWeb) и нацеленную на укрепление цифрового суверенитета России.

Технологии и статус развертывания: Группировка «Бюро 1440» проектируется с использованием передовых решений – аппараты работают на низкой околоземной орбите, связаны межспутниковыми лазерными каналами и используют протокол стандарта 5G NTN для интеграции с наземными сетями связи. Обмен данными происходит в диапазонах Ka/Ku (включая частоты, задействованные в сетях 5G) с использованием активных фазированных антенных решеток, что позволяет автоматически удерживать высокоскоростной канал при движении спутников. В 2023–2024 гг. компания провела две экспериментальные миссии – «Рассвет-1» и «Рассвет-2», запустив на орбиту шесть опытных спутников для отработки ключевых технологий. Первая миссия (три спутника массой ~80 кг, запуск 27 июня 2023 г. с Восточного) успешно проверила работу каналов связи, бортовых систем и наземной инфраструктуры в различных сценариях. Вторая миссия (три спутника, старт 17 мая 2024 г. с Плесецка) задействовала аппараты увеличенного размера, оснащенные собственными лазерными терминалами и ретрансляторами стандарта 5G NTN; в ходе ее проведения впервые в России была продемонстрирована передача данных со

спутника по протоколу 5G. Результаты испытаний (включая первый успешный сеанс спутниковой связи «борт–земля» по 5G и низкую задержку при обмене данными) подтвердили работоспособность выбранных технических решений и позволили приступить к серийному производству спутников для полноценного развертывания системы с 2025 года.

Независимость от программы «Сфера» и господдержка: в отличие от государственной программы «Сфера», которая объединяет различные субспутниковые проекты на различных орбитах (от геостационарных до низких) и предназначена для множества задач (от IoT до широкополосного доступа), «Бюро 1440» представляет собой единый частный проект узкой специализации – глобальной сети спутникового интернета с высокими скоростями и минимальными задержками. Формально группировка Rassvet (рабочее название системы) не входит в «Сферу», однако проект получил косвенную государственную поддержку. В январе 2023 г. «Бюро 1440» включили в дорожную карту перспективных космических систем РФ до 2030 г., предусматривающую содействие частным компаниям в этой сфере [9]. Кроме того, в поправках к федеральному бюджету 2024 г. были заложены ассигнования (~9,35 млрд руб.) [10] на создание и запуск первых 66 спутников «Бюро 1440». Таким образом, хотя проект реализуется при ведущей роли частного сектора, государство заинтересовано в его успехе и рассматривает низкоорбитальный интернет как стратегический ресурс – важный элемент технологической независимости и цифрового суверенитета страны.

Российский подход характеризуется сильной государственной поддержкой: «Сфера» курируется Роскосмосом и правительством РФ. В бюджет 2020–2022 гг. заложено >10 млрд руб. на начало реализации проекта, общий объем финансирования составит сотни млрд руб. с учетом стоимости запусков и разработки [11]. Участие частных компаний ограничено – основные подрядчики – это госкомпании (ИСС им. Решетнева, Газпром КС, РКС и др.). Тем не менее, декларируется привлечение частного сектора: Роскосмос поддержал сотрудничество с небольшими частными компаниями («Спутникс» и др.) для создания компонентов группировки.

Координация полностью осуществляется государством, цель – обеспечить технологическую независимость России в сфере спутниковой связи. Это стало особенно актуальным после того, как в 2018–2020 гг. российские власти фактически заблокировали работу зарубежных проектов (таких как

OneWeb) на территории РФ из соображений безопасности и информационного суверенитета [12].

Таким образом, Россия делает ставку на национальную группировку, контролируемую государством, чтобы не зависеть от иностранных спутниковых операторов.

Китай: проект «Guowang»

«Guowang» – китайский проект, направленный на создание многофункциональной спутниковой сети для обеспечения глобального доступа в интернет. Система сочетает аппараты на низкой (LEO) и средней (MEO) околоземных орбитах, что позволяет минимизировать задержку сигнала и расширить покрытие до полярных регионов. Первоначально планировалось развернуть 300 спутников на LEO (~1200 км) и 28 на MEO (~12 000 км), однако в обновленном варианте количество было увеличено до 54 LEO-спутников и 27 MEO-аппаратов для оптимизации производительности. Основная цель – обеспечить скорость передачи данных до 1 Гбит/с при задержке ~20–30 мс для LEO и ~100–150 мс для MEO.

Технологии и интеграция: Спутники оснащены лазерными межспутниковыми линиями связи, что позволяет организовать прямую передачу данных в космосе вне зависимости от наземной инфраструктуры. Для взаимодействия с наземными сетями используются диапазоны Ka/Ku, а также протокол 5G NTN. Первые два прототипа успешно запущены в октябре 2023 г., а массовые запуски начнутся с 2025 г. в целях коммерческого использования к 2026–2027 гг. [13; 14].

Стратегическая значимость: Проект реализуется при участии госкомпаний (China Aerospace Science and Industry Corporation, CASIC) и частных партнеров (Huawei, Alibaba Cloud). Финансирование оценивается в несколько миллиардов долларов, включая средства из национального бюджета. Guowang рассматривается как элемент цифрового суверенитета Китая, особенно в рамках инициативы «Один пояс – один путь» [15].

Сравнение с зарубежными системами: В отличие от Starlink, Guowang делает акцент на интеграцию с 5G и защиту данных через квантовое шифрование. По стоимости абонентского оборудования он может быть конкурентоспособен благодаря масштабному производству в Китае. Однако проект сталкивается с вызовами в координации орбитальных слотов и международной конкуренцией.

Таким образом, Guowang становится частью китайской стратегии по созданию «цифрового Шелкового пути», усиливая влияние страны в глобальной телекоммуникационной сфере.

Сводное сравнение систем

Для оценки конкурентоспособности рассмотренных проектов их ключевые параметры сведены в таблицу 1. Для сопоставления были выбраны унифицированные метрики, которые позволяют сравнить как технические, так и экономические характеристики систем. В качестве параметров рассмотрены высота орбиты, плановое и фактическое число спутников, заявленная пользовательская скорость на прямом канале (downlink), медианная задержка RTT, ориентировочная стоимость пользовательского оборудования и текущий статус развертывания. Такой подход позволяет наглядно выявить различия между системами и определить их сильные и слабые стороны с точки зрения пользователя и рынка.

LEO-системы Starlink и Project Kuiper демонстрируют наименьшую задержку (20–40 мс) благодаря орбите ниже 650 км. Starlink уже обеспечивает стабильную пользовательскую скорость 100–200 Мбит/с, тогда как Kuiper заявляет целевой рубеж 400 Мбит/с в коммерческой фазе. OneWeb, работающий на высоте ~1 200 км, показывает задержку около 50 мс при скорости порядка 100 Мбит/с – это компромисс между числом спутников (648) и качеством сервиса. Российский проект «Бюро 1440» и китайский Guowang декларируют симметричную скорость до 1 Гбит/с; ожидания по задержке для «Бюро 1440» – 50–70 мс, для Guowang – 20–30 мс на низкой орбите и 100–150 мс на среднеорбитальном сегменте. Таким образом, по критерию «скорость-задержка» лидером остается Starlink, а наиболее амбициозные значения заявлены у Guowang при условии успешной реализации гибридной LEO/MEO-архитектуры.

Starlink остается самым крупным проектом (разрешение FCC на 42 000 аппаратов, на орбите ~5 000), что обеспечивает плотную ячеистую структуру покрытия, но увеличивает при этом совокупные CAPEX и операционные расходы на запуски и обслуживание. Kuiper ограничивается 3 236 спутниками, что при сходной высоте орбиты потребует более совершенных фазированных антенн и, соответственно, высоких затрат на наземные терминалы. OneWeb достигает глобального охвата меньшим числом спутников, экономя на запусках, однако вынуждает мириться с более высокими задержками. «Бюро 1440» планирует поэтапное развертывание 300 аппаратов (380 к 2030 г.) и интеграцию со спутниками связи «ЭкспрессРВ», что потенциально снизит расходы на инфраструктуру.

Таблица 1. Сравнение систем

Система (страна)	Орбита / высота, км	Плановое / фактическое число спутников	Скорость для пользователя	Задержка, мс	Стоимость терминала	Статус проекта
Starlink (SpaceX, США)	LEO $\approx$ 550	42 000 / $\approx$ 5 000	100–200 Мбит/с	20 – 40	$\approx$ 600 USD; абонплата $\approx$ 110 USD/мес. абонплата $\approx$ 110 USD/мес.	Массовая коммерческая эксплуатация в 70+ странах
Project Kuiper (Amazon, США)	LEO 590 – 630	3 236 / 2 (демо)	до 400 Мбит/с (target)	20–40 (по T3)	не объявлена	Демонстрационный этап, массовые запуски с 2025 г.
OneWeb (Eutelsat OneWeb, Великобритания)	LEO $\approx$ 1 200	648 / 634	$\approx$ 100 Мбит/с	$\sim$ 50	не объявлена	Региональная эксплуатация; глобальный сервис к концу 2025 г.
«Бюро 1440» (Россия)	LEO $\approx$ 500	300 (380 к 2030 г.) / 2 (прототипы)	до 1 Гбит/с (по T3)	50–70 (расчет)	40–45 тыс. руб. (заявлено)	Летные прототипы «Рсвет1/2»; серийная фаза с 2025 г.
Guowang (Китай)	LEO $\approx$ 1 200 + MEO $\approx$ 12 000	54 LEO + 27 MEO / прототипы	до 1 Гбит/с	20 – 30 (LEO) / 100 – 150 (MEO)	не объявлена	Государственная программа; активная фаза с 2025 г.

Guowang использует двухъярусную схему: 54 LEO и 27 MEO – такое разнесение уменьшает плотность покрова, но позволяет гибко балансировать задержку и число аппаратов.

Развитие абонентских терминалов является критически важным фактором, влияющим на практическую скорость, энергопотребление и возможности интеграции с наземными сетями. SpaceX Starlink сделал ставку на массовый выпуск компактных фазированных антенн («тарелка» $\sim$ 0,5 м с электронным сканированием луча). Такой терминал потребляет порядка 50–100 Вт и способен обеспечивать пользователю реальные скорости $\sim$ 50–200 Мбит/с (медианная $\sim$ 66,8 Мбит/с в Великобритании в 2024 г., с пиками до 150+ Мбит/с). OneWeb изначально нацелен на b2b-рынок, поэтому полагался на партнеров для разработки терминалов: к 2023–2024 гг. появились коммерческие решения от Intellian, Hughes и др. – в том числе плоские панели и компактные двухзеркальные антенны для различных секторов (морские, авиа, фиксированные).

OneWeb изначально нацелен на b2b-рынок, поэтому полагался на партнеров для разработки терминалов: к 2023–2024 гг. появились коммерческие решения от Intellian, Hughes и др. – в том числе плоские панели и компактные двухзер-

кальные антенны для различных секторов (морские, авиа, фиксированные). Например, серийный OneWeb-терминал Hughes обеспечивает до 195 Мбит/с на прием и $\sim$ 32 Мбит/с на передачу, с автоматическим переключением между спутниками (без разрыва сессии). Другие модели рассчитаны на $\sim$ 150 Мбит/с «вниз». Габариты таких устройств, как правило, <1 м, что значительно меньше традиционных VSAT для GEO. В 2024 г. OneWeb (уже в составе Eutelsat) представила новую линейку плоских антенн Intellian OW11FL и др., способных полностью задействовать максимальную скорость OneWeb-спутника. Amazon Kuiper открыто презентовала три типа пользовательских терминалов: стандартная плоская антенна $\sim 28 \times 28$ см, толщиной $\sim 2,5$ см, вес <5 кг – поддерживает скорость до 400 Мбит/с и будет стоить $<\$400$ в производстве; ультра-компактный терминал 17×17 см весом $\sim 0,5$ кг – до 100 Мбит/с, предназначен для IoT и мобильных применений; а также большая антенна 50×76 см для корпоративных клиентов – с пропускной способностью до 1 Гбит/с. Все три используют собственные чипы Amazon (кодовое имя «Prometheus») для цифровой обработки сигнала 5G-класса. «Бюро 1440» разрабатывает терминалы, оптимизирован-

ные под свою сеть: отмечается, что они будут значительно компактнее геостационарных (типичные антенны 2–2,5 м), простые в установке (автоматическое наведение) и мобильные. Заявленная целевая скорость – до 1 Гбит/с на абонента, что подразумевает использование высокоэффективной антенной решетки в Ka/Ku-диапазоне. Испытания в 2023 г. показали, что терминал самостоятельно находит спутник и удерживает связь при перемещениях, что важно для подвижных объектов. Guowang пока не раскрыла информацию о пользовательских устройствах, но учитывая национальный акцент на «широкополосный доступ для каждого населенного пункта», ожидается появление как стационарных терминалов для сельских районов, так и интеграции с потребительскими устройствами. В долгосрочной перспективе китайские разработчики связывают свои LEO-сети с концепцией 6G NTN, где спутники смогут напрямую обслуживать совместимые смартфоны и IoT-датчики. Примечательно, что в 2024–2025 гг. происходит сближение спутниковых систем с сотовыми стандартами 5G NTN (Non-Terrestrial Network). OneWeb/Eutelsat уже провела первый в мире тест подключения 5G через действующую LEO-группировку (ноябрь 2024): использовались обычный 5G-ядерный коммутатор, тестовый терминал с чипсетом MediaTek, эмулирующий смартфон с поддержкой 3GPP Release 17 NTN, и спутник OneWeb на орбите. В ходе испытания 5G-устройство успешно зарегистрировалось в сети через спутник и передавало данные, продемонстрировав возможность интеграции спутникового канала в инфраструктуру 5G. Это означает, что будущие пользователи смогут получать сервис непосредственно на стандартные телефоны в зонах без вышек – спутники станут аналогом базовых станций, работающих по единым стандартам. Eutelsat заявила, что стандарт NTN ляжет в основу их новой европейской группировки IRIS² и следующего поколения OneWeb. «Бюро 1440» также активно внедряет 5G-наработки: новые спутники «Рассвет-2» (май 2024) оснащены аппаратурой, реализующей протокол 5G NTN на борту. Это позволит российской системе напрямую взаимодействовать с наземными сетями операторов. Уже запланировано, что на первом этапе развертывания (к ~2027 г.) 500 базовых станций оператора «МегаФон» в удаленных районах России будут подключены через низкоорбитальные спутники «Бюро 1440» – фактически, спутники обеспечат backhaul для сотовой сети 4G/5G. SpaceX, в свою очередь, объявила программу Starlink Direct-to-Cell: модернизированные спутники с

2024 г. начнут предоставлять прямое соединение к обычным телефонам (начиная с SMS, затем голос и широкополосные сервисы) в сотрудничестве с мобильными операторами. В частности, T-Mobile (США) и Starlink готовят первый такой сервис на частоте ~1,9 ГГц, совместимый с существующими телефонами, используя 5G NR-NTN в спутниковом сегменте. Таким образом, тенденция показывает, что LEO-системы становятся частью экосистемы 5G, дополняя наземные сети и обеспечивая беспроводную связь для пользователей.

Заключение

Проведенный в статье сравнительный анализ спутниковых систем глобального интернета показывает, что на сегодняшний день данные технологии являются ключевым фактором преодоления цифрового неравенства и обеспечения качественной связи в удаленных и труднодоступных регионах мира. Системы на низкой околоземной орбите (LEO), такие как Starlink и Kuiper (США), «Бюро 1440» (Россия) и Guowang (Китай), демонстрируют наиболее привлекательные технические характеристики по части скорости передачи данных и минимальной задержки сигнала. Они открывают новые возможности для обеспечения высокоскоростного доступа в интернет, способного конкурировать с наземными сетями.

При этом выбор орбитальной конфигурации спутников оказывает значительное влияние на качество и доступность услуг. Низкоорбитальные системы, несмотря на высокие начальные затраты и сложность поддержания больших группировок спутников, предоставляют лучшие пользовательские характеристики по сравнению с традиционными геостационарными системами.

Также следует отметить важность государственной поддержки и частно-государственного партнерства в развитии спутниковых систем. В США и Китае активно используются механизмы интеграции частных компаний с государственными структурами, обеспечивающие быстрый рост и технологическое лидерство. Российский подход сочетает сильную государственную поддержку с постепенным привлечением частных инициатив, стремясь обеспечить технологическую независимость и информационный суверенитет.

Однако несмотря на все преимущества, спутниковые системы сталкиваются с рядом технологических, экономических и регуляторных препятствий. Среди них – необходимость координации использования орбитальных слотов, управление космическим мусором, обеспечение кибербезопасности и международное регулирование частотного ресурса.

В перспективе развитие глобального спутникового интернета способно существенно повлиять на мировую коммуникационную инфраструктуру, делая доступ к высокоскоростному интернету универсальным и общедоступным, а также стимулируя дальнейшее развитие инноваций и международного сотрудничества.

Стоимость пользовательского терминала Starlink на 2025 г. составляет ≈ 600 USD, абонентская плата – 110 USD/мес. (домашний тариф). Одновременно SpaceX разворачивает сервис DirecttoCell [8] совместно с T-Mobile: с начала 2024 г. абоненты в США уже могут отправлять и принимать SMS прямо со смартфона без отдельного спутникового терминала, а к июлю 2025 г. планируется расширить услугу до передачи данных и голосовых вызовов по цене около 15 USD/мес. Это означает, что для базовой мобильной связи критичность покупки фирменной антенной станции постепенно снижается, тогда как терминал остается необходимым для высокоскоростного домашнего доступа. Kuiper и OneWeb пока не раскрывают окончательные цены, но ориентируются на диапазон 400–600 USD за терминал при подписке 70–100 USD/мес. Российский проект декларирует субсидируемую цену терминала в 40–45 тыс. рублей и тарифы, сопоставимые с фиксированным широкополосным доступом в регионе. Для Guowang ожидается сильная государственная поддержка, что может снизить барьеры входа на массовый рынок Китая. В совокупности это указывает, что ценовое лидерство в ближайшей перспективе сохранит Starlink за счет эффекта масштаба, тогда как Kuiper и Guowang ставят на более высокую производительность и дальнейшее удешевление терминалов.

Литература

1. Спутниковый интернет: как работает и что ждет в будущем // Habr: портал о высоких технологиях. URL: <https://habr.com/ru/articles/876460/> (дата обращения: 28.03.2025).
2. Westphal C., Han L., Li R. LEO Satellite networking relaunched: survey and current research challenges // ITU Journal on Future and Evolving Technologies. 2023. Vol. 4, no. 4. P. 712–733.
3. Анпилогов В. Системы спутникового «Интернета вещей» для беспроводной сети // Беспроводные технологии. URL: <https://wireless-e.ru/iot/sistemy-sputnikovogo-iot/> (дата обращения: 28.03.2025).
4. Madaus E. 2021 Year in review: Statistics and satellites // CosmoQuest. 2022. URL: <https://cosmoquest.org/x/2022/01/2021-year-in-review-statistics-and-satellites/> (дата обращения: 25.03.2025).
5. Cakaj Sh. The parameters comparison of the «Starlink» LEO satellites constellation for different orbital shells // Frontiers in Communications and Networks. 2021. Vol. 2. P. 643095. DOI: 10.3389/frcmn.2021.643095
6. Project Kuiper // AboutAmazon. URL: <https://www.aboutamazon.com/what-we-do/devices-services/project-kuiper> (дата обращения: 28.03.2025).
7. Сфера // Роскосмос: официальный сайт госкорпорации Роскосмос. URL: <https://www.roscosmos.ru/tag/sfera/> (дата обращения: 28.03.2025).
8. Direct-to-Cell // Starlink: официальный сайт спутникового интернет-сервиса SpaceX. URL: <https://www.starlink.com/us/business/direct-to-cell> (дата обращения: 28.03.2025).
9. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309. URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&link_id=0&nd=606911096 (дата обращения: 28.03.2025).
10. 445 млрд для «Бюро 1440» // РБК. URL: <https://www.rbc.ru/newspaper/2024/09/17/66e8671f9a79472a671f62eb> (дата обращения: 28.03.2025).
11. Экономика данных // Национальные проекты России. URL: <https://национальныепроекты.рф/new-projects/ekonomika-dannykh/> (дата обращения: 28.03.2025).
12. ФСБ увидела угрозу нацбезопасности в проекте глобального интернета // РБК. URL: <https://www.rbc.ru/business/24/10/2018/5bd094239a794767f7fcel1d6> (дата обращения: 28.03.2025).
13. China's Guowang launch raises questions about satellite purpose and transparency // SpaceNews. URL: <https://spacenews.com/chinas-guowang-launch-raises-questions-about-satellite-purpose-and-transparency/> (дата обращения: 28.03.2025).
14. Press L. Guowang finally launches ten large production satellites // CircleID blog. URL: <https://circleid.com/posts/guowang-finally-launches-ten-large-production-satellites> (дата обращения: 28.03.2025).
15. Guo Wang: China's answer to starlink? // Royal United Services Institute. URL: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/commentary/guo-wang-chinas-answer-starlink> (дата обращения: 28.03.2025).

Дата поступления 01.04.2025

Дата принятия 05.05.2025

Булусhev Павел Павлович, студент Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 903 300-55-00. E-mail: 230063@edu.psuti.ru

Мещеряков Игорь Юрьевич, студент ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 927 715-56-03. E-mail: mk88vvv@vk.com

Борисов Виталий Валериевич, ассистент кафедры управления в технических системах (УТС) ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 927 339-11-00. E-mail: v.borisov@psuti.ru

Тарасов Вениамин Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой УТС ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 846 228-00-13. E-mail: v.tarasov@psuti.ru

UDC 629.783

DOI: 10.18469/ikt.2025.23.2.15

COMPARATIVE ANALYSIS OF SATELLITE SYSTEMS FOR GLOBAL INTERNET

Bulushev P.P., Meshcheryakov I.Yu., Borisov V.V., Tarasov V.N.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: 230063@edu.psuti.ru, mk88vvv@vk.com, v.borisov@psuti.ru, v.tarasov@psuti.ru

This article presents a comparative analysis of modern satellite systems designed to provide global internet access. The study focuses on the technological features, deployment strategies, security aspects, and accessibility of major satellite networks currently being developed and operated worldwide. Particular attention is given to the technical and economic parameters that determine performance and feasibility of these systems. The analysis covers key characteristics such as data transmission speed, latency, service costs, and the extent of global coverage. The work also evaluates the advantages and limitations of different orbital configurations, including low, medium, and geostationary orbits, which significantly influence the quality and availability of internet services. In addition, the research observes the prospects for the integration of satellite internet into the global communication infrastructure, considering both technical advancements and geopolitical factors. The article concludes highlighting the challenges associated with satellite-based internet, such as signal delay, regulatory issues, and the management of orbital resources, while emphasizing its potential to reduce digital inequality and expand connectivity in remote and underserved regions of the world.

Keywords: *satellite internet, low Earth orbit, geostationary orbit, medium Earth orbit, digital sovereignty, laser inter-satellite link, 5G NTN, IoT, global coverage, signal latency, satellite constellation*

Bulushev Pavel Pavlovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Student. Tel. +7 903 300-55-00. E-mail: 230063@edu.psuti.ru

Meshcheryakov Igor Yuryevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Student. Tel. +7 927 715-56-03. E-mail: mk88vvv@vk.com

Borisov Vitaly Valerievich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Assistant of Management in Technical Systems Department. Tel. +7 927 339-11-00. E-mail: v.borisov@psuti.ru

Tarasov Veniamin Nikolaevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Head of Management in Technical Systems Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 846 228-00-13. E-mail: v.tarasov@psuti.ru

References

1. Satellite internet: How it works and what the future holds. *Habr: portal o vysokih tekhnologiyah*. URL: <https://habr.com/ru/articles/876460/> (accessed: 28.03.2025). (In Russ).
2. Westphal C., Han L., Li R. LEO satellite networking relaunched: Survey and current research challenges. *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*, 2023, vol. 4, no. 4, pp. 712–733.
3. Anpilogov V. Satellite IoT systems for seamless networks. *Besprovodnye tekhnologii*. URL: <https://wireless-e.ru/iot/sistemy-sputnikovogo-iot/> (accessed: 28.03.2025). (In Russ).
4. Madaus E. 2021 Year in review: Statistics and satellites. *CosmoQuest*, 2022. URL: <https://cosmoquest.org/x/2022/01/2021-year-in-review-statistics-and-satellites/> (accessed: 25.03.2025).
5. Cakaj Sh. The parameters comparison of the «Starlink» LEO satellites constellation for different orbital shells. *Frontiers in Communications and Networks*, 2021, vol. 2, pp. 643095. DOI: 10.3389/frcmn.2021.643095
6. Project Kuiper. *AboutAmazon*. URL: <https://www.aboutamazon.com/what-we-do/devices-services/project-kuiper> (дата обращения: 28.03.2025).
7. Sphere. *Roskosmos: oficial'nyj sayt goskorporacii Roskosmos*. URL: <https://www.roscosmos.ru/tag/sfera/> (accessed: 28.03.2025). (In Russ)
8. Direct-to-Cell. *Starlink: oficial'nyj sayt sputnikovogo internet-servisa SpaceX*. URL: <https://www.starlink.com/us/business/direct-to-cell> (accessed: 28.03.2025).
9. On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the future up to 2036: Decree of the President of the Russian Federation of May 7, 2024, no. 309. URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&link_id=0&nd=606911096 (accessed: 28.03.2025). (In Russ.)
10. P445 billion for Bureau 1440. *RBK*. URL: <https://www.rbc.ru/newspaper/2024/09/17/66e8671f9a79472a671f62eb> (accessed: 28.03.2025). (In Russ).
11. Data economy. *Nacional'nye proekty Rossii*. URL: <https://национальныепроекты.рф/new-projects/ekonomika-dannykh/> (accessed: 28.03.2025). (In Russ).
12. FSB sees threat to national security in global internet project. *RBK*. URL: <https://www.rbc.ru/business/24/10/2018/5bd094239a794767f7fce1d6> (accessed: 28.03.2025). (In Russ).
13. China's Guowang launch raises questions about satellite purpose and transparency. *SpaceNews*. URL: <https://spacenews.com/chinas-guowang-launch-raises-questions-about-satellite-purpose-and-transparency/> (accessed: 28.03.2025).
14. Press L. Guowang finally launches ten large production satellites. *CircleID blog*. URL: <https://circleid.com/posts/guowang-finally-launches-ten-large-production-satellites> (accessed: 28.03.2025).
15. Guo Wang: China's answer to starlink? *Royal United Services Institute*. URL: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/commentary/guo-wang-chinas-answer-starlink> (accessed: 28.03.2025).

Received 01.04.2025

Accepted 05.05.2025