

АРХИТЕКТУРА СЕТЕЙ 6G: принципы и особенности построения

Часть 2

В.Тихвинский, д.э.н., академик РАН,
проф. МВТУ им. Н.Э.Баумана и МУИТ (Республика Казахстан),
главный научный сотрудник ФГУП НИИР им. М.И.Кривошеева /
vtnir@mail.ru,

Е.Девяткин, к.э.н., директор НТЦ ФГУП НИИР им. М.И.Кривошеева / deugene@list.ru,

В.Белявский, директор департамента ООО "Спектр" / v.belyavskiy@spectre.ru,

Ю.Смирнов, к.т.н., начальник отдела НИИ Минобороны РФ

УДК 621.391.82, DOI: 10.22184/2070-8963.2022.104.4.44.49

Статья посвящена анализу принципов и особенностей построения архитектуры сетей шестого поколения (6G) с учетом сформированного на сегодняшний день видения развития и облика сетей мобильной связи международными и национальными проектами сетей 6G, а также Международным союзом электросвязи и государственно-частным партнерским проектом 5GPPP. Во второй части статьи представлены архитектура сетей на платформах LAPS и HAPS и космического сегмента сетей 6G.

АРХИТЕКТУРА И ОСОБЕННОСТИ СЕТЕЙ НА ПЛАТФОРМАХ LAPS

Платформы воздушной связи, относящиеся к низкоподнятым LAPS (Low Altitude Platform Station) и высокоподнятым платформам HAPS (HIBS / High Altitude Platform Stations as IMT Base Stations) станут частью будущих сетей связи 6G. Низкоподнятые (по высоте) платформы LAPS с высотами полета до 10 км основываются на узлах радиодоступа и ретрансляторах сетей 6G, размещенных на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Платформы LAPS называют также подключенными к сетям 6G БПЛА или UAV (Unmanned Aerial Vehicles), которые обеспечивают взаимодействие с высокоподнятыми платформами HAPS (HIBS)-to-LAPS и с территориально-распределенной мобильной сетью 6G (рис.4).

Архитектура LAPS представляет собой платформу для размещения узлов радиодоступа (базовых станций) и ретрансляторов 6G, обеспечивающих временное подключение к сети 6G как наземных, так и летающих абонентских терминалов в районах с отсутствующей или поврежденной инфраструктурой наземной беспроводной сети 6G. Платформа LAPS используется для построения микросотовой архитектуры сети в районах применения.

Среди инноваций 6G в структуру платформы LAPS вводятся в качестве транзитного соединения оптические линии связи на основе технологии "оптика в свободном пространстве" (FSO). Эти оптические линии связи БПЛА передают информацию по каналам FSO в режиме "точка-точка", что позволяет сети БПЛА обеспечивать высокую

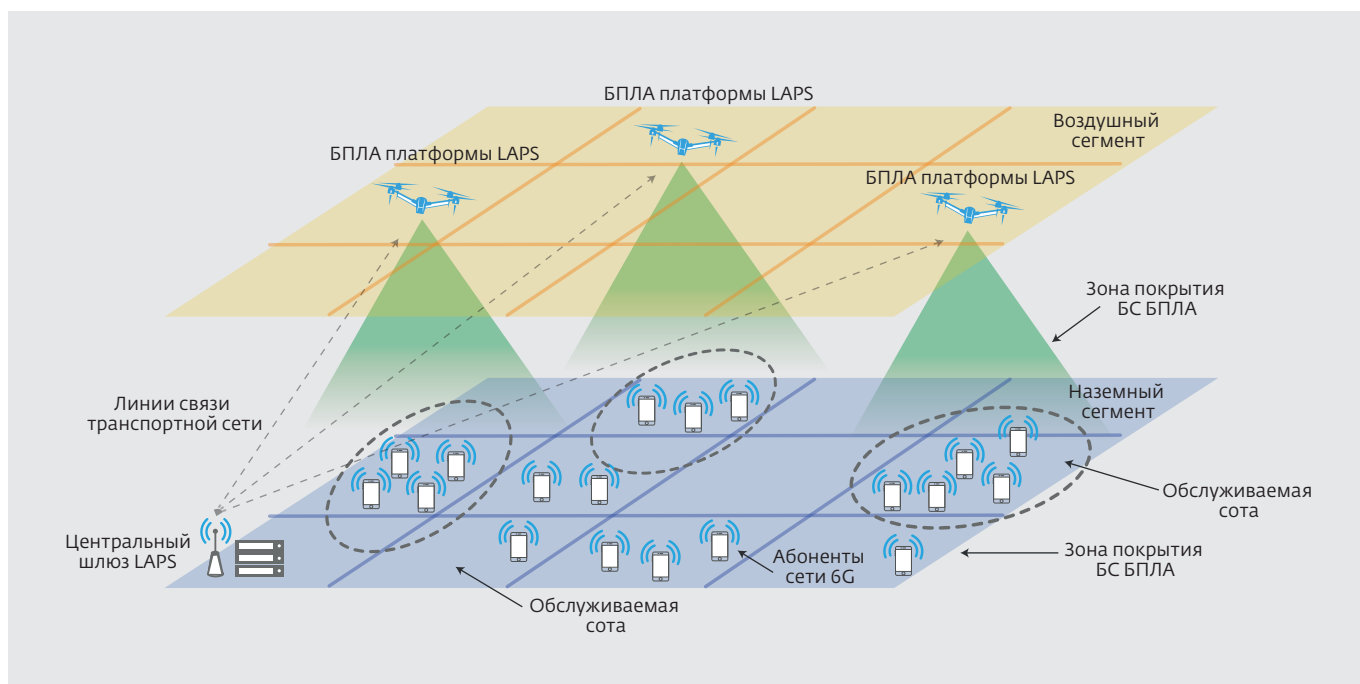


Рис.4. Платформа воздушной связи LAPS

скорость передачи данных в различных погодных условиях [20].

Для создания подсистемы воздушных сетей 6G используют три различающихся сценария использования БПЛА, поддерживающих беспроводную связь в сети на платформе LAPS, которые могут быть исследованы дополнительно в контексте сетей 6G.

1. БПЛА как абонентский терминал

БПЛА могут рассматриваться как воздушные абоненты (абонентские устройства) сети LAPS, использующие беспроводные технологии 6G для передачи данных, управления и полета. У БПЛА типа DUE (Drone User Equipment) будет канал прямой связи с наземными БС сети 6G. Следовательно, применение БПЛА типа DUE должно гарантировать их совместимость с созданной наземной инфраструктурой сети 6G, поскольку существенные помехи, которые они могут вызвать, смогут серьезно повлиять на качество сети [21].

2. БПЛА как ретранслятор

БПЛА типа DR (Drone Repeater) могут использоваться в сети LAPS в качестве ретранслятора. Ретрансляция используется как метод повышения пропускной способности и надежности связи

6G, а также увеличения покрытия за счет увеличения дальности связи [22].

Использование БПЛА данного типа в качестве мобильных ретрансляторов применимо для приложений 6G, устойчивых к задержкам. БПЛА типа DR может непрерывно летать (висеть) между местом, где находится источник сигнала, и местом приема сигнала, чтобы обеспечить его прием во время фазы ретрансляции. Принятые данные можно передать и на наземную станцию БС, оснатив дрон абонентским терминалом 6G. Если требуются данные в реальном времени, дроны могут обмениваться данными друг с другом, чтобы сократить время передачи данных от источника к месту назначения.

Одна из основных проблем воздушных релейных линий – это динамическое изменение параметров каналов связи из-за мобильности и движения БПЛА типа DR в пространстве. Поэтому в подсистеме LAPS сети 6G в воздушных сетях при беспроводной ретрансляции необходимо обеспечить использование надежных протоколов радиодоступа.

3. БПЛА как базовые станции 6G

На борту таких БПЛА могут быть размещены как полнофункциональные базовые станции 6G (DBS – Drone Base Station или UxNB – Unmanned

Aerial NodeB), так и их элементы при использовании пространственно-распределенных базовых станций [22].

Узел радиодоступа на борту беспилотного летательного аппарата (UxNB) – это устройство, предоставляющее услуги 6G абонентским терминалам, размещенным на БПЛА. Летящая БС типа DBS (UxNB) может подключаться к ядру сети 6G Core в качестве элемента наземной сети как базовая станция 6G RAN с радиоинтерфейсом 6G.

Такие воздушные БС могут помочь разгружать наземные базовые станции 6G и уменьшить перегрузку сети или увеличить зону покрытия там, где это требуется, путем перемещения зоны покрытия в сторону повышенного спроса на услуги 6G. По сравнению с наземными БС 6G воздушные типа DBS (UxNB) подсистемы LAPS выигрывают за счет имеющихся возможностей потенциальной мобильности LAPS и регулируемой высоты их размещения для повышения вероятности установления прямого соединения с пользователями.

АРХИТЕКТУРА И ОСОБЕННОСТИ СЕТЕЙ НА ПЛАТФОРМЕ HAPS

Система узлов радиодоступа/БС на высокоподнятых летающих платформах HAPS (HIBS) может создаваться как воздушная подсистема сети 6G и использоваться как для установления широкополосных соединений для пользователей, так и в качестве линий передачи между наземными сетями мобильной связи 6G и другими воздушно-космическими сетями связи для передачи транзитного трафика.

В Регламенте радиосвязи (PP) МСЭ [23] платформа HAPS (HIBS) определяется как узел радиодоступа, расположенный на летающем объекте на высоте 20–50 км в определенной номинальной фиксированной относительно Земли точке.

После развертывания сети 6G платформа HAPS станет третьим основным уровнем инфраструктуры интегрированной сети. Благодаря своему срединному положению между наземными территориально-распределенными и спутниковыми сетями, а также большой площади покрытия сети HAPS, которая объединяет несколько наземных территориально-распределенных и низковысотных сетей на платформе LAPS, первая становится центром связи и управления, соединяющим пользователей со многими сетями и системами, входящими в сеть 6G.

Варианты полезной нагрузки оборудования связи сети 6G на платформе HAPS могут строиться

на трех подходах к ее размещению, представленных на рис.5:

- базовой станции как узла радиодоступа сети 6G;
- ретранслятора без обработки сигнала;
- ретранслятора с преобразованием и обработкой сигнала.

Согласно решениям ВКР-19 [24], существующее распределение спектра фиксированной службе в полосах частот 31–31,3 ГГц, 38–39,5 ГГц также определено мобильным сетям связи на платформе HAPS на всемирной основе. На этой же всемирной радиоконференции было подтверждено, что существующие распределения спектра для сетей связи на платформе HAPS в полосах частот 47,2–47,5 ГГц и 47,9–48,2 ГГц могут использоваться на всемирной основе администрациями связи для развертывания станций на высокоподнятых платформах. На ВКР-19 также согласовали использование полос 21,4–22 ГГц и 24,25–27,5 ГГц фиксированной службой в Районе 2. Согласованные на глобальном и региональном уровнях частотные назначения для HAPS позволяют перейти для будущих сетей 6G от испытаний к коммерческому развертыванию.

АРХИТЕКТУРА КОСМИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА СЕТЕЙ 6G

Спутниковые сети с высокой пропускной способностью (HTS) при их использовании для построения фрагментов интегрированных воздушно-космических сетей 6G способны предоставлять услуги широкополосного доступа в интернет, сопоставимые с услугами наземных сетей мобильной связи с точки зрения их цены, качества и пропускной способности.

Большинство космических аппаратов связи находятся на геостационарной орбите GEO на высоте 35 786 км, что, естественно, приводит к чрезмерной задержке сигналов в космическом сегменте и невозможности интеграции с наземной сетью мобильной связи.

Для обеспечения подключения к глобальному интернету предлагается использовать спутниковые системы на негеостационарной орбите (NGSO) с низкой задержкой и высокой скоростью передачи данных, с учетом того, что в ближайшее время несколько космических группировок будут коммерциализированы:

- **Starlink:** американская компания SpaceX планирует запустить группировку из 4425 низкоорбитальных спутников (LEO)

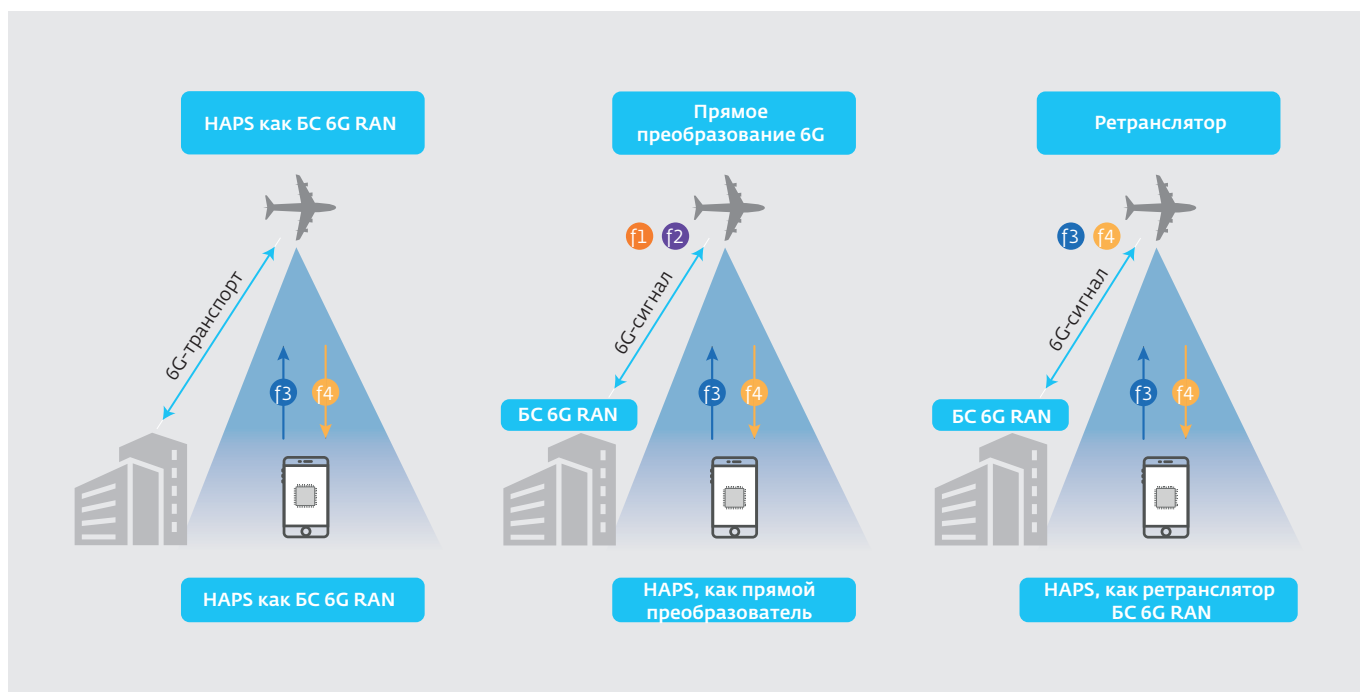


Рис.5. Варианты использования оборудования связи сети 6G на платформе HAPS


и 7518 спутников VLEO на орбитах с высотой примерно 340 км. SpaceX начала предоставлять коммерческие услуги доступа в интернет в северной части США и Канаде в 2020 году. По состоянию на август 2021 года число пользователей (бета-тестеров) абонентского оборудования Starlink достигло 100 тыс. в 14 странах мира;

- **OneWeb:** 27 февраля 2019 года компания OneWeb успешно вывела на орбиту свои первые шесть космических аппаратов. Созвездие состоит из 720 спутников LEO [25] и получило разрешения

от регулятора Великобритании и американской FCC;

- **Hongyan:** Китайская корпорация аэрокосмических технологий и науки CASC запустит девять спутников LEO в качестве пилотной демонстрации данной системы, которая в конечном итоге должна состоять из 320 спутников и будет завершена к 2025 году.


Хотя до полного развертывания спутниковых систем NGSO и конвергенции спутниковой связи и мобильных беспроводных сетей в сетях 6G еще далеко, преимущества спутниковых сетей LEO



ИНФОТЕЛ
Интеллект. Опыт. Результат.

ONEPLAN

**ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И УСЛУГИ
ПО ПЛАНИРОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ
СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ
И ФИКСИРОВАННОЙ СВЯЗИ**



step@rpls.ru
+7 812 590-77-11
www.rpls.ru

уже подтверждены исследованиями. Сеть LEO с лазерным и радио- (RF-) каналами совместной маршрутизации может обеспечить связь с меньшей задержкой, чем наземные волоконно-оптические сети при расстоянии связи, превышающем примерно 3 тыс. км [26].

При создании сетей 6G с топологией STIN можно использовать спутники связи на низкой околоземной орбите LEO, имеющей высоту от 500 до 2000 км от поверхности Земли, для развертывания сети доступа и обеспечения глобального покрытия сети 6G.

Сети связи LEO как спутниковый элемент сети 6G должны улучшать свои характеристики чтобы достигать меньших потерь при распространении сигналов на трассах между сетями связи GEO и территориально-распределенной наземной частью мобильной сети 6G, уменьшая задержки при передаче данных и обеспечивая высокие уровни качества услуг. Однако, в настоящее время в сетях связи LEO существует целый ряд проблем таких как флуктуации доплеровского сдвига, большая задержка при передаче сигналов и значительные потери на трассах распространения [2].

Спутники на орбитах LEO движутся очень быстро по сравнению с вращением Земли. Это приводит к доплеровскому изменению параметров сигнала и доплеровскому сдвигу частоты в сетях связи, что вызывает проблемы с обеспечением доступа в сеть, синхронизацией, обнаружением и измерением сигнала. Дополнительными проблемами пока являются большие значения задержки передачи сигналов и большие потери на трассе распространения в сетях связи LEO по сравнению с наземной частью сети мобильной связи 6G.

Партнерство 3GPP в своих Технических отчетах исследует различные архитектуры построения не-наземной сети NTN в зависимости от степени интеграции между различными воздушно-космическими элементами [27]. Анализ отчетов этого партнерства показывает, что в космическом сегменте 6G предусматриваются следующие виды архитектуры [28]:

- прозрачная спутниковая архитектура сети радиодоступа (RAN), в которой космический аппарат повторяет сигнал пользователя от фидерной линии до служебной линии и наоборот;
- регенеративная спутниковая архитектура RAN, в которой полезная нагрузка спутника реализует регенерацию сигналов,

полученных с Земли, а также обеспечивает межспутниковую связь с использованием транспортной сети;

- архитектура с множеством подключений, включающая две прозрачные RAN (либо GEO, либо LEO, либо их комбинацию), где также поддерживается интеграция наземного и не-наземного доступа абонентов.

Таким образом, воздушно-космические элементы сети 6G будут играть важную роль в построении общей архитектуры сети и определять возможности их интеграции в STIN-архитектуру сети на основе концепции построения сети из сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный выше прогностический анализ показал, что архитектура сети 6G должна быть достаточно гибкой и эффективной, чтобы обеспечить простую интеграцию всего: сети, интегрирующей другие сети, межсетевых связей, не-наземных сетей (спутниковых GEO, LEO, воздушных LAPS, HAPS) и наземной территориально-распределенной подсистемы мобильной связи, включая опорную сеть 6G Core на базе искусственного интеллекта, а также локальные и распределенные вычислительные ресурсы и возможности.

Вместо простого взаимодействия между сетями связи на спутниках, самолетах, БПЛА и наземными сетями мобильной связи в сетях 6G будут внедрены интегрированные наземные и не-наземные сети, которые обеспечивают глубокую конвергенцию и интеграцию космических, воздушных и наземных сетей в единую сеть 6G. Такая интеграция потребует создания сервис-ориентированной сетевой архитектуры, которая будет содержать унифицированные абонентские устройства, узлы доступа (наземные и летающие БС) сети радиодоступа 6G, соответствующие интерфейсы, интерфейсные и сетевые протоколы для удовлетворения требований унифицированного доступа и приложений для различных устройств.

Учитывая, что сети 6G относятся к многомерным 3D-сетям, которые интегрируют также многоуровневую инфраструктуру, состоящую из спутников связи, высотных платформ и наземных БС, то пути интеграции должны включать такие решения, которые обеспечивают конвергентный доступ, скоординированное 3D-покрытие, согласованное динамическое использование частотного спектра, унифицированное интеллектуальное обслуживание и эксплуатацию сетей.

Благодарность

Настоящая статья подготовлена в рамках реализации программы деятельности ЛИЦ "Глобальные беспроводные системы связи" при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации и АО "Российская венчурная компания". Договор № 015/20 от 18 мая 2020 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет FGNET-2030 "Новые услуги и возможности для сети NET2030: описание, технический разрыв и анализ целевых показателей производительности". Женева: МСЭ-Т, октябрь 2019.
2. **Rappaport T.S.** et al. Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond // IEEE Access. 2019. Vol. 7. PP. 78729–78757.
3. **Akyildiz I.F., Kak A. and Nie S.** 6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 133995–134030.
4. Technical Specification. FG-NET2030 – Focus Group on Technologies for Network 2030. Network 2030 Architecture Framework. Geneva: ITU-T, June 2020.
5. **Lee Y.L., Qin D., Wang L.C. and Sim G.H.** 6G Massive Radio Access Networks: Key Applications, Requirements and Challenges // IEEE Open Journal of Vehicular Technology. 2021. Vol. 2. PP. 54–66.
6. Проект рекомендации МСЭ-R М. [IMT VISION 2030 AND BEYOND]. Женева: МСЭ-R, 2021.
7. Белая книга МСЭ "Сеть 2030 – проект технологии, приложений и драйверов рынка на пути к 2030 году и далее" (май 2019).
8. Технический отчет "Сети 2030 – Дополнительное представление сценариев использования и ключевых требований к сетям 2030 (июнь 2020).
9. Технический отчет "Сети 2030 – Gap – анализ новых услуг, возможностей и сценариев использования сетей 2030" (июнь 2020).
10. ГОСТ Р ИСО/МЭК 18384-1-2017. Информационные технологии (ИТ). Эталонная архитектура для сервис-ориентированной архитектуры (SOA RA). Часть 1. Терминология и концепции SOA.
11. Технический отчет FG NET-2030 "Анализ недостающих услуг, возможностей и вариантов использования NET-2030" (июнь 2020).
12. **Zhang S., Zeng Y. and Zhang R.** Cellular-enabled UAV communication: Trajectory optimization under connectivity constraint // Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC), Kansas City, USA. May 2018.
13. **Xing Y., Hsieh F., Ghosh A. and Rappaport T.S.** High Altitude Platform Stations (HAPS): Architecture and System Performance // 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), April 2021. PP. 1–6.
14. **Giordani M. and Zorzi M.** Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities // IEEE Network2021. Vol. 35. No. 2. PP. 244–251.
15. WhitePaper on 6G Networking. 6G Research Visions, No. 6. Oulu: University of Oulu.
16. **Osahenwemwen O.A.** Overview of TCP performance in satellite communication networks // International Journal of Technical Research and Applications. 2015. Vol. 3. Issue 3. PP. 360–364.
17. **Li R.** New IP: Going beyond the Limits of the Internet. IEEE Globecom, 2019.
18. **Yao H., Wang L., Wang X., Lu Z. and Liu Y.** The space-terrestrial integrated network: An overview // IEEE Commun. Mag. 2018. Vol. 56. No. 9. PP. 178–185.
19. **Liu J., Shi Y., Fadlullah Z.M. and Kato N.** Space-Air-Ground Integrated Network: A Survey // IEEE Communications Surveys Tutorials. 2018. Vol. 20. No. 4. PP. 2714–2741.
20. **Alzenad M., Shakir M.Z., Yanikomeroğlu H. and Alouini M.** FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5GC wireless networks // IEEE Commun. Mag. 2018. Vol. 56. No. 1. PP. 218–224.
21. **Bergh B.V.D., Chiumento A. and Pollin S.** LTE in the sky: trading of propagation benefits with interference costs for aerial nodes // IEEE Communications Magazine // 2016. Vol. 54. No. 5. PP. 44–50.
22. **Zeng Y., Zhang R. and Lim T.J.** Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. No. 5. PP. 36–42.
23. Регламент радиосвязи. Женева: МСЭ-R, 2020.
24. Основные итоги Всемирной конференции радиосвязи 2019 года // ITU News Magazine. 2019. № 6.
25. **Radtke J., Kebschull C. and Stoll E.** Interactions of the space debris environment with mega constellations. Using the example of the OneWeb constellation // Acta Astronautica. 2017. Vol. 131. PP. 55–68.
26. **Handley M.** Delay is not an option: Low latency routing in space // Proceedings of 17-th ACM Workshop Hot Topics Netw. 2018. PP. 85–91.
27. 3GPP TR 38.821. Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN) (Release 17). 2021.
28. **Тихвинский В.О., Стрелец М.В.** Перспективы создания спутникового сегмента 5G // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2018. № 1. С. 44–52.