

# АРХИТЕКТУРА СЕТЕЙ 6G: принципы и особенности построения

Часть 1

**В.Тихвинский**, д.э.н., академик РАЕН, проф. МВТУ им. Н.Э. Баумана, главный научный сотрудник ФГУП НИИР им. М.И.Кривошеева / vtiiir@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: 10.22184/2070-8963.2022.103.3.50.56

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 (МСЭ) и государственно-частным партнерским проектом 5GPPP. В первой части статьи представлены принципы построения архитектуры сети 6G, в том числе сквозной сетевой протокол New IP, описывается общая архитектура сети 6G.

## ВВЕДЕНИЕ

Сети мобильной связи шестого поколения (6G) представляют собой эволюцию сетей 5G Advanced как перспективу развития телекоммуникаций за пределы 2030-х годов, которая обеспечивает инфраструктурную интеграцию воздушно-космических сетей связи для дальнейшего развития и совершенствования цифровой экономики РФ. Концепция создания и облик сетей мобильной связи 6G будут определять будущую архитектуру сети, которая должна реализовать принцип обеспечения соединения и оказания услуг связи "для любого абонента в любом месте в любое время".

Обеспечение принципа соединения в любом месте с любым абонентом подразумевает наличие воздушно-космического сегмента в архитектуре сети в дополнение к традиционной наземной сети мобильной связи, что соответственно

будет расширять и дополнять наземную архитектуру новыми элементами воздушных и спутниковых сетей.

Согласно определению МСЭ, архитектура сети 6G (Network 2030) будет представлять "сквозную интегрированную, автоматизированную и динамическую архитектуру сети, сочетающую возможности подключения, приложения, вычислительные ресурсы и ресурсы хранения" [1]. Эта архитектура будет являться эволюционным переходом от существующей сервис-ориентированной архитектуры 5G (архитектуры подключения абонентов) к архитектуре с расширенной виртуализацией различных уровней сетевой архитектуры, применением методов искусственного интеллекта (ИИ)/машинного обучения, использованием прикладных API-интерфейсов для автоматизации, внедрением оптических (квантовых) вычислений, а также будущих приложений, требующих огромной пропускной способности сети, а также

низкой сквозной задержки (менее 2 мс) и практически нулевой потери пакетов данных.

Концепция построения программно- и сервис-ориентированной архитектуры (SBA), реализованная в пятом поколении сетей мобильной связи для оказания услуг интернет, уходит от модели "один клиент – один сервер". При построении архитектуры сети 5G этот подход был ограничен функциональными возможностями плоскости управления и возможностями базовой сети (CN), а также применением архитектуры управления сетью на основе услуг (SBMA) без полного перехода к сквозной SBA. При этом в сети 5G используется абонентское оборудование, работающее с логически распределенными узлами сети радиодоступа (RAN).

Как ожидается, в сети шестого поколения сервис-ориентированная архитектура SBA может распространиться по всей инфраструктуре сети через все плоскости: управления, контроля и абонента, и обеспечить сквозной охват сети (E2E), включая опорную сеть 6G Core, сеть радиодоступа 6G RAN и терминалы. Это сделает гораздо более широкий охват элементов архитектуры сети 6G возможностями SBA и создаст операционную гибкость, обеспечив поддержку архитектуры, создаваемую как "сеть из сетей" и реализацию концепции "системы из систем" для упрощения интеграции и масштабируемости подсистем 6G.

Архитектура мобильных сетей 6G должна быть гибкой и эффективной, чтобы обеспечить простую интеграцию всех сетей, входящих в воздушно-космическую и наземную части сети 6G, то есть создание сети из сетей, включая узлы радиодоступа, использующие частоты выше 100 ГГц [2], транспортные сети, обеспечивающие межсетевое взаимодействие, не-наземные сети NTN и наземные сети связи, а также новые возможности ИИ и возможности локальных и распределенных вычислений [3].

В частности, интеграция элементов не-наземных сетей NTN (например, спутниковых сетей LEO, MEO, GEO и общесетевых воздушных/космических узлов доступа, которые могут быть связаны между собой) предлагает расширенное и дополнительное покрытие сети для подключения, а также возможности распределенных хранилищ данных и вычислительных услуг. Чтобы реализовать эту новую архитектуру интеллектуальных услуг и взаимодействия в вертикальных и связанных цепочках создания стоимости [4], архитектура 6G должна иметь возможность интегрировать критически важные сети с надежностью, доступностью и отказоустойчивостью, превышающей традиционные услуги 5G URLLC,

предоставляя гибкость построения инфраструктуры для обеспечения непрерывности в обслуживании.

### Принципы построения архитектуры сети 6G

Основными принципами построения архитектуры сети мобильной связи 6G должны стать способности обеспечивать более высокую степень инфраструктурной гибкости и функциональности, что показано в исследованиях [4, 5]. Это позволит сети 6G с расширенными и адаптируемыми функциями архитектуры поддерживать новые варианты использования интеграции выделенных/специальных /производственных сетей вертикальных отраслей "Индустрии 4.0", предлагая при этом мобильные сети и для целей общего доступа, и в качестве частных интеллектуальных сетей для предоставления услуг в смешанных бизнес-средах и рынках (например, в таких отраслях, как логистика, производство, сельское хозяйство, энергетические сети и цифровое образование).

Прогностический анализ облика сетей 6G [6–9] показывает, что в основе их архитектуры будут применены следующие принципы, отражающие инновационные подходы к построению мобильных сетей связи:

- интеграция наземного и воздушно-космического сегментов в архитектуру сети (STIN-архитектура) для обеспечения соединения и оказания услуг связи "для любого абонента в любом месте в любое время";
- применение 3D-архитектуры (пространственно-распределенной трехмерной архитектуры) сети, охватывающей все пространства размещения сегментов интегрированной сети 6G: наземное, воздушное и космическое;
- использование локальных суб-сетей, интегрирующихся в глобальную сеть 6G на принципах создания архитектуры "сети из сетей";
- использование сервис-ориентированной архитектуры SBA [10] в опорной сети 6G Core на основе общей интерфейсной шины для различных видов услуг, которая обеспечит операционную гибкость и масштабируемость;
- построение архитектуры сети на основе повсеместного применения нового усовершенствованного IP-протокола (New IP) [11].

Ключевые особенности построения архитектуры сетей 6G будут включать использование интеллектуальных функций сетевого управления и сетевого контроля, программируемости сетевых элементов и функций сети, интеграцию измерения, датчиков и связи, сокращение энергопотребления, использование надежной инфраструктуры, масштабируемость и доступность.

Архитектура 6G должна быть достаточно гибкой и эффективной, чтобы обеспечить простую интеграцию всех подсистем и элементов, включая сети нижнего уровня, например создание одних сетей из других, взаимную интеграцию услуг связи, определение местоположения (позиционирование) и зондирование, интеграцию воздушно-космических не-наземных сетей и территориально-распределенных сетей наземной связи, интеграцию новых средств сетевой поддержки на базе ИИ, а также локальных и распределенных вычислительных сетевых ресурсов.

Целью STIN-интеграции наземного и воздушно-космического сегментов сети 6G является использование взаимосвязанных спутников на низкой околоземной орбите LEO и других не-наземных летающих сетевых узлов доступа на низковысотных (LAPs) [12] и высокоподнятых (HAPs) [13] платформах для создания воздушно-космической сети интернет, которая может взаимодействовать с наземным сегментом этой сети.

На рис.1. представлен вариант построения многоуровневой архитектуры наземно-космической интегрированной STIN-сети для построения сети 6G [14].

В такой интегрированной структуре сети 6G реализованы ключевые преимущества, которые обеспечивают:

- повсеместный доступ в интернет, включая сельские районы, океаны, пустыни, при помощи движущихся телекоммуникационных платформ, размещенных на спутниках, на кораблях и беспилотных воздушных судах или самолетах;
- расширенные маршруты интернета, которые могут привести к более высокой производительности доставки данных по сравнению с маршрутами по наземной сети, определяемыми конфигурациями протокола пограничного шлюза (BGP) между доменами;
- повсеместное пограничное кэширование и услуги граничных вычислений, предоставляемые облегченными бортовыми вычислительными ресурсами (малыми данными) и ресурсами хранения на спутниках LEO.

По сравнению с существующей инфраструктурой сетей спутниковой связи одной из важных функций будет возможность будущих мобильных устройств 6G (смартфоны, планшеты и т. д.) напрямую связываться с локально доступным спутником LEO без необходимости использовать соединения через традиционную инфраструктуру наземных сетей, которые ограничены территориальным распределением базовых станций и узлов доступа.

## Сквозной сетевой протокол New IP

Одной из важнейших инноваций в архитектуре сети 6G станет сквозное использование протокола New IP вместо устаревшего IP-протокола с версиями IPv4 и IPv6. Однако решение этого технического вопроса политизируется специалистами американской технологической зоны.

Как отмечается в [15], необходимость создания и использования в сети 6G протокола New IP будет обусловлена следующим. Сеть 6G будет объединять как наземные, так и не-наземные сети связи NTN. При этом протоколы TCP/IP, используемые в сетях наземной мобильной связи, не подходят для сетей не-наземной связи, включая элементы сети спутниковой связи, потому что протокол TCP/IP уменьшает эффективность сетей спутниковой связи из-за наличия большой задержки в передаче данных, сверхширокой полосы пропускания и более высокой частоты ошибок по битам. Следовательно, требуется модификация протокола TCP/IP для эффективной поддержки как наземных, так и не-наземных сетей связи. Поскольку в упомянутых типах сетей связи реализованы разные протоколы, то обеспечение совместимости последних будет создавать проблемы [16].

Существующая архитектура стека интернет-протокола (сетевая модель TCP/IP) изначально была разработана для передачи данных и за последние 40 лет глубоко проникла в архитектуру мобильных сетей. Однако сегодня интернет столкнулся с множеством беспрецедентных проблем и не может гарантировать устранения ограничений, формируемых в будущем новыми приложениями мобильных сетей (например, устанавливаемые пределы пропускной способности и задержки).

В последние годы некоторые протоколы, построенные на основе TCP/IP, такие как QUIC (Quick UDP Internet Connections), в некоторой степени облегчили эти проблемы. К сожалению, эти patch-подобные протоколы усложняют интернет и не могут полностью исправить имеющиеся недостатки. Это приводит к необходимости модернизации протоколов TCP/IP, и ожидается, что новые разработки позволят предоставлять услуги, выходящие за рамки сквозной транспортировки данных.

Инновации, введенные в протокол New IP, состоят из трех частей: адресация, предоставление услуг на основе соглашений и связанных с полезной нагрузкой в IP, что приводит к новому сетевому уровню, называемому New IP. Третья часть инноваций – блок Contract – протокола New IP позволит управлять качеством услуг сети на основе использования информации о заключенном уровне SLA и подписки абонента сети 6G.

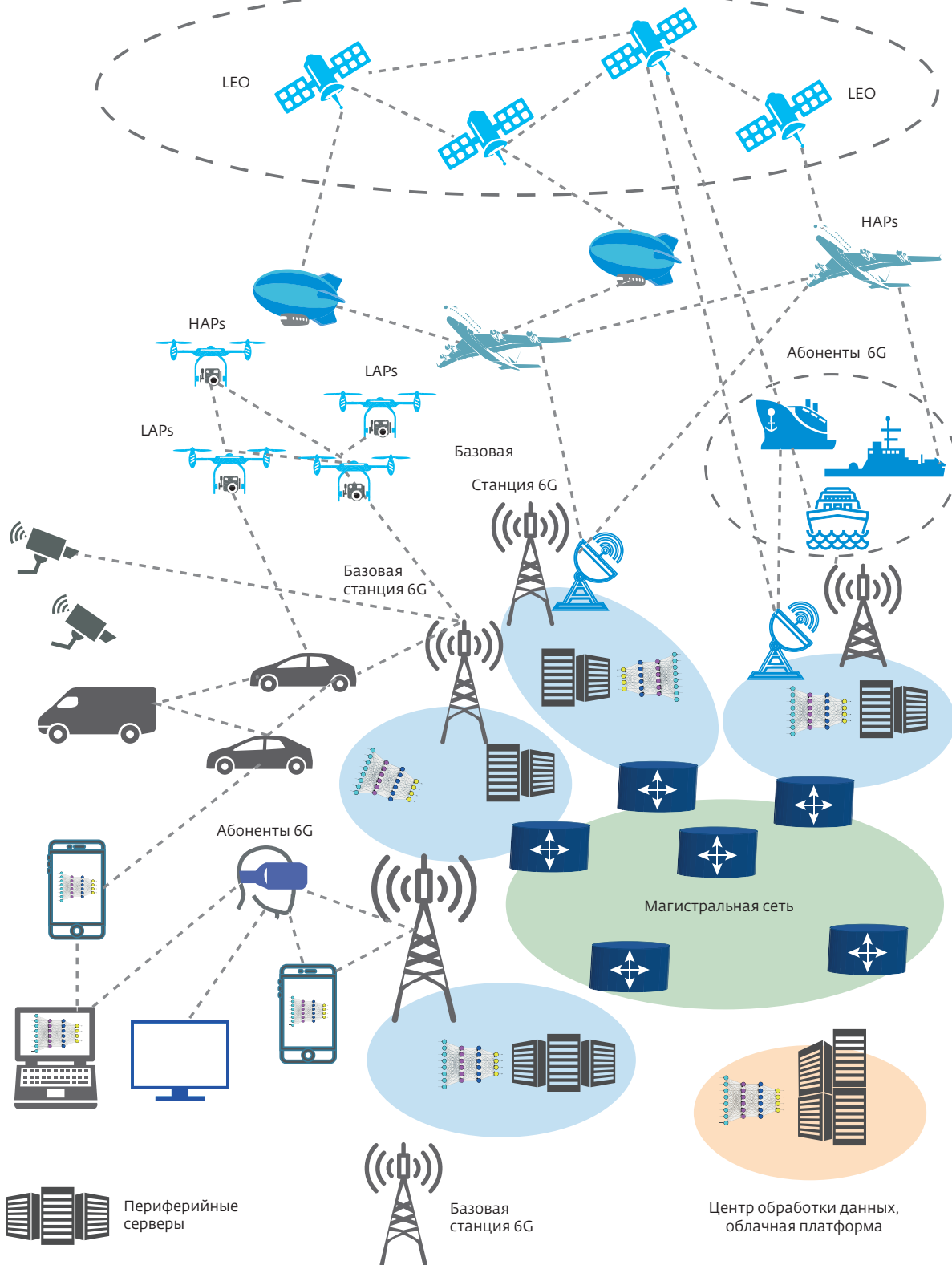
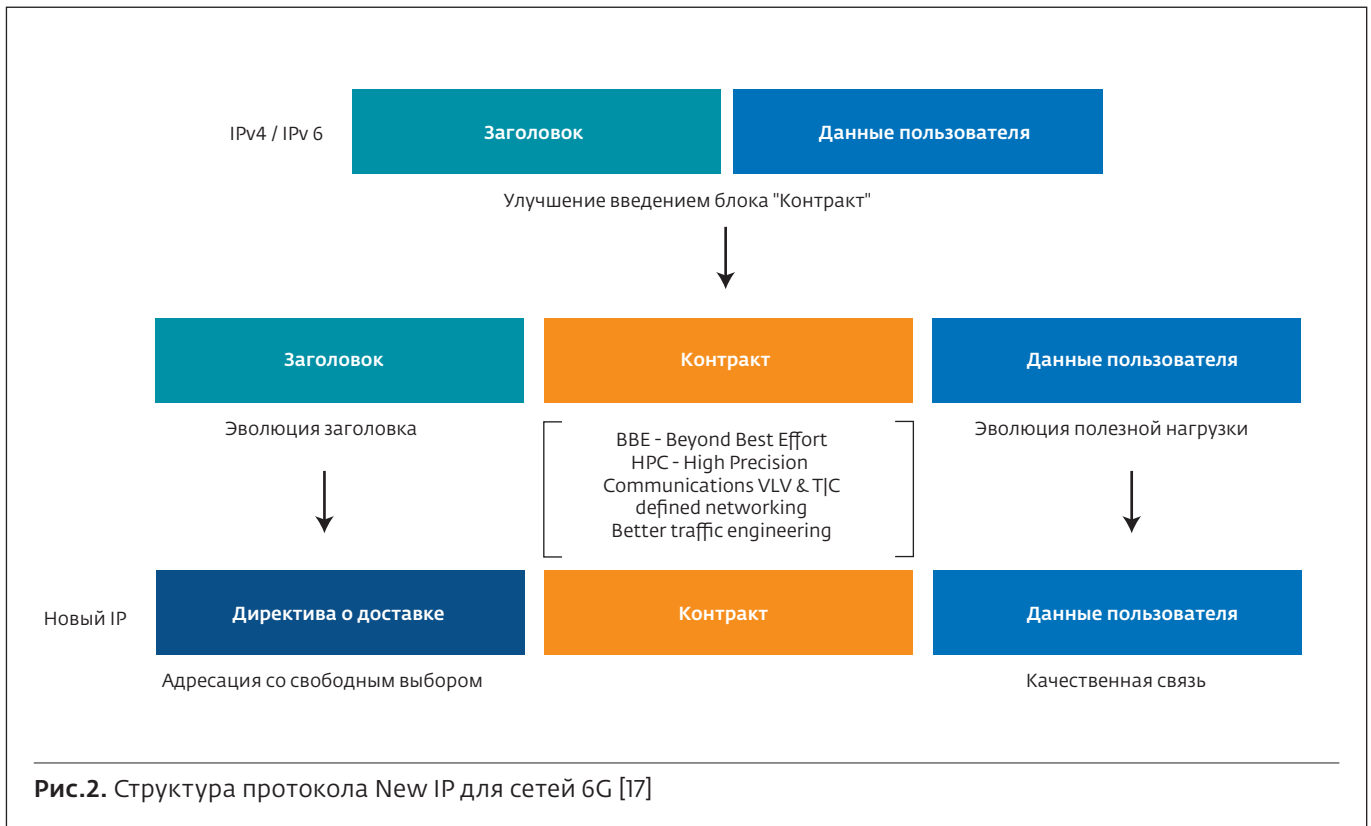


Рис.1. Вариант построения STIN-архитектуры сети 6G



**Рис.2.** Структура протокола New IP для сетей 6G [17]

Протокол New IP как новый объединяющий сетевой уровень простирается как выше, так и ниже пресловутого третьего уровня, чтобы обеспечить интеграцию функций транспортного и канального уровней в возможности обслуживания. Концепция данного протокола обеспечивает новую схему пакетирования, которая переводит IP в расширяемый формат пакета, как показано на рис.2.

Новые IP-пакеты будут разделены на три компонента, которые отличаются от текущего IP-адреса следующим образом:

- заголовок будет развиваться, чтобы обеспечить большую гибкость в отношении того, как можно обращаться к системам. Он сможет поддерживать широкий спектр схем адресации с различной адресной структурой, семантикой и длиной. Заголовок также будет направлен на исправление связанных с безопасностью аспектов существующих заголовков IP-адресов, таких как неаутентифицированные исходные адреса, которые сегодня являются факторами, способствующими широкому спектру атак;
- полезная нагрузка пользователя будет предлагать дополнительную поддержку, которая позволяет приложениям структурировать полезную нагрузку, дифференцированно обрабатывать ее в сети и облегчать использование

усовершенствованных схем сетевого кодирования. Это будет достигнуто без ущерба конфиденциальности данных полезной нагрузки пользователя;

- появляется новый компонент – контракт, которого сегодня нет в IP-пакетах. Введение его позволяет включать семантические метаданные в пакеты, которые могут использоваться для установления гарантий уровня обслуживания, а также новых схем, которые упрощают обеспечение обслуживания и операции. Примеры семантических метаданных включают цели уровня обслуживания, директивы, которые дают руководство по обработке пакетов и потоков, а также данные измерений и телеметрии для пакетов в пути.

Более конкретные подробности о новом формате и структуре IP обсуждаются в новых спецификациях [15–17]. Переход с текущего IP-адреса на новый может происходить между компонентами совершенно независимо. Например, его изначально расширяемая природа, в первую очередь за счет новых IP-контрактов, позволяет внедрять межуровневые инновации, используя возможности нижележащих канальных уровней (Ethernet, оптический и т. д.), а также выполнять функции управления перегрузкой внутри сети и потоком для транспорта.

Специфические для приложения функции могут по-прежнему разрабатываться на конечных хостах, сохраняя жизненно важные характеристики сквозного принципа.

Протокол New IP также включает в себя развитие соответствующих протоколов контроля, маршрутизации и управления. Эти решения сильно зависят от формата пакета, используемого для сетей 6G. Следовательно, решение и консенсус в отношении того, что будет передаваться по сети, должны стать первым шагом на пути к эволюции сетевого протокола. Наконец, не все требования к приложениям подпадают под требования сетей 6G, и существующая модель интернета должна работать с новым протоколом New IP, поэтому обратная совместимость является критической характеристикой этого протокола. При этом учитывается, что существующие схемы адресов (например, IPv4 и IPv6) соответствуют формату нового New IP-пакета. Изменения полезной нагрузки или адресации необязательны, когда в них нет необходимости. New IP может работать с существующей семантикой и предоставляет компоненты для дополнительных услуг в сетях 6G.

### ОБЩАЯ АРХИТЕКТУРА СЕТИ 6G

Целью построения 3D-архитектуры воздушно-космической сети мобильной связи шестого поколения является необходимость расширения пространства покрытия и обеспечения соединения абонентов в любом месте в любое время, что существенно расширяет требования к обеспечению глубины покрытия услугами интегрированной сети связи 6G.

Существующая сетевая архитектура сетей поколений 2G–5G, основанная на унаследованной наземной территориально-распределенной сотовой инфраструктуре, имеет два следующих недостатка:

- невозможность удовлетворить сценарии высокогорной и подводной (глубоководной) связи;
- непомерно дорогая стоимость обеспечения плотных сотовых сетей для достижения возможности подключения в любой точке (малонаселенной местности, пустыне, океане).

Чтобы устранить указанные выше недостатки, сеть 6G будет объединять воздушно-космические не-наземные сети NTN для обеспечения полного беспроводного покрытия всего 3D-пространства зон обслуживания [18]. Облик интегрированной сети связи 6G, охватывающей пространства "космос – воздух – земля – море" (рис.3), рассмотрен в работе [19].

К основным элементам архитектуры сети 6G на уровне сетей относится архитектура подсистем связи:

- наземных территориально-распределенных мобильных и транспортных сетей;
- наземных и воздушно-космических суб-сетей ведомственного и отраслевого уровня, а также частных мобильных сетей;
- не-наземных воздушно-космических пространственно-распределенных сетей NTN.

Каждая из подсистем и суб-сетей будет включать в себя узлы радиодоступа и замыкаться на единую пространственно-распределенную опорную сеть 6G Core на основе принципа интеграции сети из сетей.

В классическом понимании как территориально-распределенная часть сети сеть 6G будет включать:

- сеть радиодоступа 6G RAN, расширенную в части использования радиочастотного спектра от миллиметрового до терагерцового и оптического диапазонов;
- опорную (базовую) сеть 6G Core;
- транспортную сеть 6G Backhaul, охватывающую как наземную территориально-распределенную часть, так и воздушно-космическую часть для присоединения к опорной сети 6G Core;
- сеть синхронизации 6G Syn, обеспечивающая частотную, фазовую и временную синхронизацию сигналов в сети 6G.

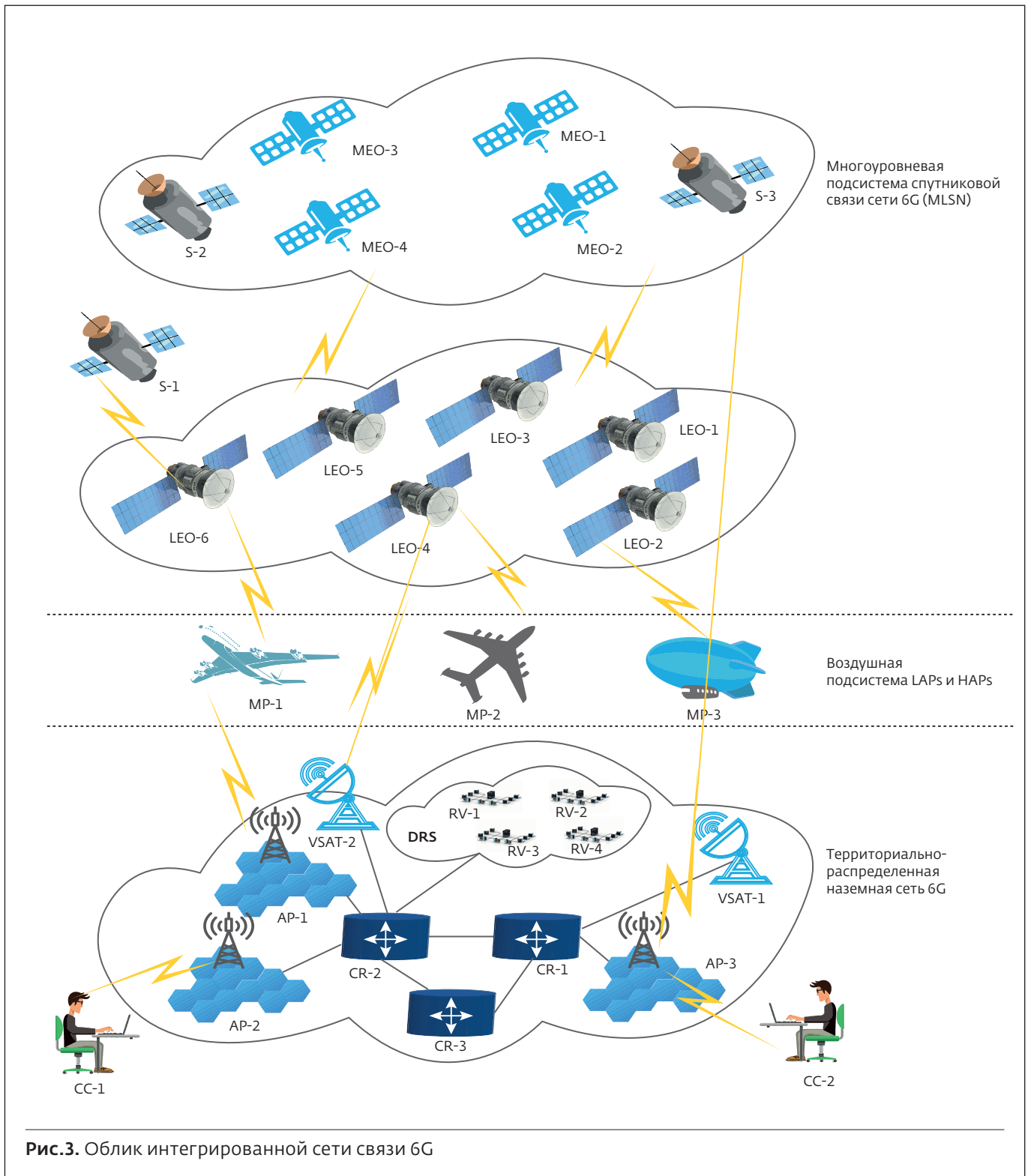
На уровне сети радиодоступа 6G RAN основными элементами будут узлы доступа, использующие радиотехнологии, а также технологии терагерцовые и оптические.

Опорная сеть 6G Core будет включать функциональные модули, реализующие управление сети в целом и обеспечивающие построение сервисно-ориентированной архитектуры сети при оказании услуг 6G.

Сети 6G также должны обеспечить связь под водой. Однако подводная среда является совершенно другим сценарием по сравнению с воздухом или космосом. Подводная среда непредсказуема и сложна, характеризуется высоким затуханием сигнала, влияет на возможности физического повреждения оборудования на больших глубинах и создает сложности в развертывании подводной части сети 6G.

В соленой воде радиосигналы сильно ослабляются, поэтому акустическая связь – единственный вариант для передачи данных из сети 6G к пилотируемым и беспилотным подводным аппаратам. Развертывание подводных узлов акустической связи как подсистемы сети 6G – дело дорогое и сложное, поэтому плотность таких узлов должна быть низкой.

Подвижность узлов акустической связи затруднена из-за колебаний потока и плотности воды. Подводные датчики движения разработаны с учетом дополнительной защиты от подводной среды.



**Рис.3.** Облик интегрированной сети связи 6G

Более того, для такой связи требуются сложные трансиверы и большой объем памяти. При разработке источников питания следует иметь в виду, что солнечная энергия не может использоваться в подводных условиях. Выход из строя подводных

датчиков ускоряют загрязнение и коррозия. Таким образом, чтобы обеспечить эффективную подводную связь в сети 6G, необходимо преодолеть проблемы влияния подводных условий на распространение сигналов и эксплуатацию сети. ■



ПРАВИТЕЛЬСТВО  
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА  
И ДОРОЖНОГО ХОЗЯЙСТВА  
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ТРАНСПОРТНАЯ ДИРЕКЦИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



БАШКИРСКАЯ  
ВЫСТАВОЧНАЯ  
КОМПАНИЯ

# VII специализированный форум и выставка ТРАНСПОРТ УРАЛА

21-23 сентября | 2022 | Уфа  
**ВДНХ ЭКСПО**



[www.uraltransexpo.ru](http://www.uraltransexpo.ru)

#транспортныйфорум #транспортурала



(347) 246-42-00, 246-42-29



[avto@bvkexpo.ru](mailto:avto@bvkexpo.ru)