

Цифровые двойники на базе развития технологий BIM, связанные онтологиями, 5G, IoT и смешанной реальностью для использования в инфраструктурных проектах и IFRABIM

В.П.Куприяновский, А.А.Климов, Ю.Н.Воропаев, О.Н.Покусаев, А.П.Добрынин, И.В.Понкин, А.А. Лысогорский

Аннотация— В настоящей статье речь идет о цифровых двойниках и их применении в BIM-технологиях. Информационное моделирование зданий (BIM) знаменует собой поворотный момент для отраслей, вовлеченных в жизненный цикл, улучшая сотрудничество, эффективность и производительность. Этот метод представляет собой одну из наиболее важных революций в цифровой экономике, сосредоточив внимание на информационном аспекте каждого проекта и способствуя улучшению хорошо спроектированных систем управления объектами. Цифровой двойник (Digital Twin) - это цифровая копия физического объекта или процесса, помогающая оптимизировать эффективность бизнеса. Концепция «цифрового двойника» является частью четвертой промышленной революции и призвана помочь предприятиям быстрее обнаруживать физические проблемы, точнее предсказывать их результаты и производить более качественные продукты. Фундаментально, цифровой двойник может быть определен как постоянно меняющийся цифровой профиль, содержащий исторические и наиболее актуальные данные о физическом объекте или процессе, что позволяет оптимизировать эффективность бизнеса без физического вмешательства в сложные процессы. В работе подробно рассматривается использование цифровых двойников и смешанной реальности в системах информационного моделирования инфраструктуры (infraBIM). В частности, подробно рассмотрено применение infraBIM при проектировании железных дорог.

Ключевые слова—BIM, цифровые двойники.

Статья получена 20 января 2020.

В.П.Куприяновский РУТ (МИИТ) (email: v.kupriyanovsky@rut.digital)

А.А.Климов РУТ (МИИТ) (email: aaklimov1961@gmail.com)

Ю.Н.Воропаев АО «МКД» (email: voropaev@mcd.spb.ru)

О.Н.Покусаев - РУТ (МИИТ); buildingSmart Россия (email: o.pokusaev@rut.digital)

А.П.Добрынин - МГУ имени М.В. Ломоносова (email: andrey.p.dobrynin@gmail.com)

И.В.Понкин - Институт государственной службы и управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (e-mail: i@lenta.ru)

А.А. Лысогорский РУТ (МИИТ) (email: a.lysogorskii@rut.digital)

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время новые цифровые технологии уже играют важную роль в секторе строительства, который переживает период значительных изменений. Эти подвижки инициированы изменениями в Градостроительном кодексе России, в котором введено понятие информационной модели (BIM) и принятием BIM стандартов РФ на базе открытых стандартов IFC buildungSmart. Кроме того, применение информационных моделей (BIM) становится обязательным на всем жизненном цикле зданий и сооружений. В этом процессе BIM представляет несомненного главного героя, революционизируя традиционный способ работы на основных этапах работы: проектирование, строительство и техническое обслуживание. Однако наличие всех этих аспектов под уникальной методологией может привести к нескольким проблемам без прочной основы для регулирования всей процедуры. Огромное количество информации, а также большое количество вовлеченных людей, являются основными слабыми сторонами, которые могут стать основными сильными сторонами, когда процесс обслуживания или Facility Management вовлечен в процесс. В этом сценарии понадобятся формализованные онтологии, которыми можно регулировать с помощью методологии BIM множество процессов и отношений, многие из которых описаны в публикациях [1- 20].

Информационное моделирование зданий (BIM) знаменует собой поворотный момент для отраслей, вовлеченных в жизненный цикл, улучшая сотрудничество, эффективность и производительность. Этот метод представляет собой одну из наиболее важных революций в цифровой экономике, сосредоточив внимание на информационном аспекте каждого проекта и способствуя улучшению хорошо спроектированных систем управления объектами (FM). Фактически, управление данными становится главным персонажем в жизненном цикле здания и сооружения, начиная с первого его наброска и заканчивая планом

обслуживания, и в этом контексте системы FM играют важную роль. BIM и FM стремятся решить все проблемы взаимодействия, которые всегда были характерны как для строительного сектора, так и для эксплуатации.

После информации, еще одним важным моментом BIM является метод, основанный на 3D-модели, который приносит новые возможности визуализации архитектуры, которые никто не мог изобразить и практически связывает цифровой и физические миры вплоть до образования цифровых двойников. Все сказанное выше имеет непосредственное отношение к инфраструктурам: городам, железнодорожному, автомобильному, водному и авиационному транспорту и сегодня уже выделяется как понятие IFRABIM [33].

II. BIM КАК ОСНОВА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ИНФРАСТРУКТУР

Цифровой двойник (англ. Digital Twin) — цифровая копия физического объекта или процесса, помогающая оптимизировать эффективность бизнеса. Концепция «цифрового двойника» является частью четвертой промышленной революции и призвана помочь предприятиям быстрее обнаруживать физические проблемы, точнее предсказывать их результаты и производить более качественные продукты [21].

Появление концепции цифровых двойников было связано с ростом цифровизации производственных процессов, в ходе которой физические или аналоговые ресурсы заменялись информационными или цифровыми. Организации следовали за последними тенденциями и пытались определить, как цифровые решения могут помочь им извлечь как операционную, так и стратегическую выгоду.

Вплоть до второй половины 2010-х создание компьютеризированных систем, повторяющих характеристики физических объектов почти в режиме реального времени, было невозможным ввиду технических ограничений. И лишь существенный прорыв в развитии цифровых технологий, позволивший увеличить вычислительные мощности и снизить цену их использования, позволил ведущим компаниям объединять информационные технологии с операционными процессами для создания цифровых двойников предприятий.

В индустриальных и научных источниках, определения «цифрового двойника» отличаются. Согласно некоторым из них, цифровой двойник является интегрированной моделью уже построенного продукта, которая призвана содержать информацию обо всех дефектах изделия и регулярно обновляется в процессе физического использования [21]. Другим распространённым определением является цифровая модель, полученная на основании информации с датчиков, установленных на физическом объекте, которая позволяет симулировать поведение объекта в реальном мире [21]. Ни одно из этих определений,

впрочем, не придаёт достаточного внимания процессам, как важному аспекту цифрового двойника.

На самом деле некоторые процессы настолько сложны, что вы не можете рисковать неудачей, экспериментируя с другим потенциально выгодным подходом. Другие процессы настолько важны для операций, что вы не осмеливаетесь отключить их, чтобы протестировать инновационный метод. И многие физические процессы движутся с такой силой, что вы не можете прервать их, чтобы попробовать что-то новое. Чтобы использовать старую аналогию - трудно менять колеса в движущемся поезде. И это может расстраивать, когда новый дизайн может принести десятки ценных преимуществ. Для этого нужен цифровой двойник, в котором такие возможности есть. Более того в очень многих случаях требуются натурные испытания инноваций по самым строгим правилам, зачастую они могут получиться невероятно дорогими или просто невозможными. Тут так же на помощь приходит цифровой двойник. Все это приводит к невероятному ускорению внедрения новшеств в практику и резкому рывку в экономических результатах.

Фундаментально, цифровой двойник может быть определён как постоянно меняющийся цифровой профиль, содержащий исторические и наиболее актуальные данные о физическом объекте или процессе, что позволяет оптимизировать эффективность бизнеса без физического вмешательства в сложные процессы. Он основан на огромном объёме накопленных данных, полученных в ходе измерений целого ряда показателей объекта в реальном мире. Анализ накопленных данных позволяет получать точную информацию о производительности системы, а также приводит к выводам о необходимости во внесении изменений, как в производимый продукт, так и в сам процесс производства [21].

На примере цифровой железной дороги в публикации 2017 года [12] было показана примерная архитектура цифрового двойника и ее взаимосвязь с физическими процессами. Сегодня эти представления для тех же железных дорог стали более детальными, и мы их приводим на рисунке 1. В этих представлениях уже появились BIM, AR, VR, CAD и т.д. Стали и более ясными сами типы цифровых двойников, снимая многие вопросы, о которых шла речь выше (рисунок 2).

Появились понятия: существующего (existence) двойника, статуса двойника, операционного двойника, двойника для симуляций и когнитивного двойника.

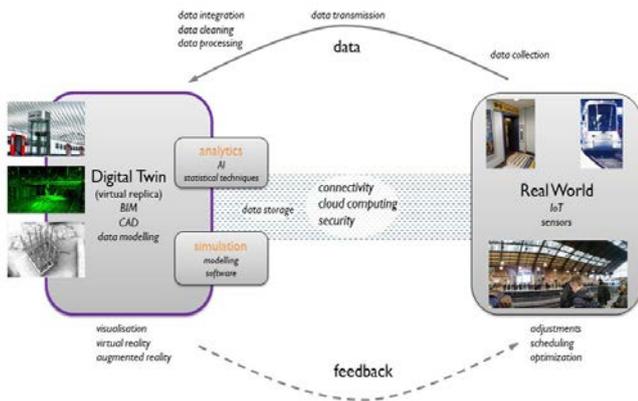


Рис. 1. Система цифровых двойников железной дороги, показывающая связи между близнецом и реальным миром, который она представляет и между путем и поездом (подчеркнутые термины являются ключевыми технологическими факторами) (источник - <https://www.rssb.co.uk/Insights-and-News/Blogs/Digital-twin-and-the-railway---one-framework-many-implementations>)

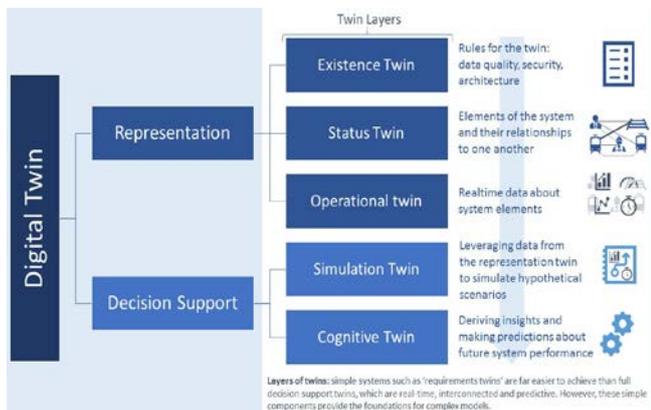


Рис. 2. Схема предлагаемых слоев цифровых двойников (источник - <https://www.rssb.co.uk/Insights-and-News/Blogs/Digital-twin-and-the-railway---one-framework-many-implementations>)

Введение понятия жизненного цикла в BIM неизбежно приводит к смене парадигмы чисто строительного подхода к подходу управления активами [13]. Активы, в свою очередь, начинают разделяться на цифровые и физические. Подходы к управлению ими также становятся отличными друг от друга. Так для цифрового актива требуется построить системы цифровой непрерывности и целостности для обеспечения функционирования цифрового двойника [12.13], а так же совсем иную систему безопасности. Интегрально практическое построение цифровых двойников приводит к появлению новых понятий, которые могут уже начать заменять старые и потенциально менять стандартизацию. Так, Сингапур объявил о построении своего цифрового двойника [24], по этому пути также идет Гонконг и другие. Как прецедент цифровой Сингапур уже трансформирует такие понятия как умный город и цифровое правительство, но при этом также имеет в своей основе BIM.

В эту новую экосистему взаимосвязи цифрового двойника с другими цифровыми решениями входит и программа национальных цифровых двойников, разрабатываемая в Великобритании [24]. Взаимосвязанность процессов реального мира и возможности расширения их взаимодействия через цифровых двойников приводят к понятиям их зрелости (рисунок 3), в основании которых также находятся данные об активах (физических и цифровых), выступающие связующим звеном понятий физического мира и мира цифровых двойников.

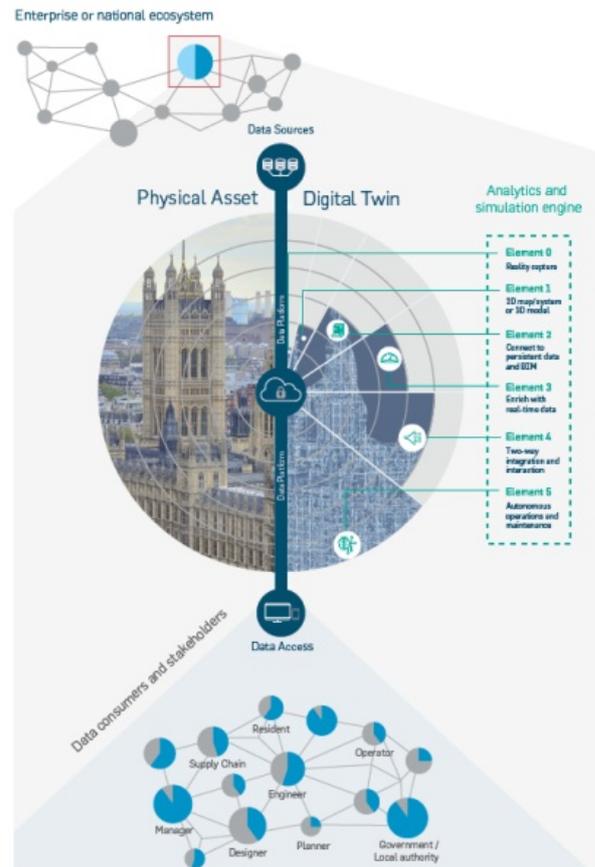


Рис. 3. Спектр зрелости цифрового двойника[26]

Как цифровые копии инфраструктур реального мира эти двойники имеют, потенциальные преимущества которые легко понять: прямое применение вычислительной мощности для решения сложных, осязаемых проблем в физическом мире. Полезные для различных отраслей промышленности, они могут повысить точность, контроль и предсказуемость при решении ряда задач.

Понятие цифровых двойников быстро перестает быть предметом научных обсуждений, и цифровые близнецы быстро становятся воспринимаемыми как инженерами, так и экономистами (рисунок 4).

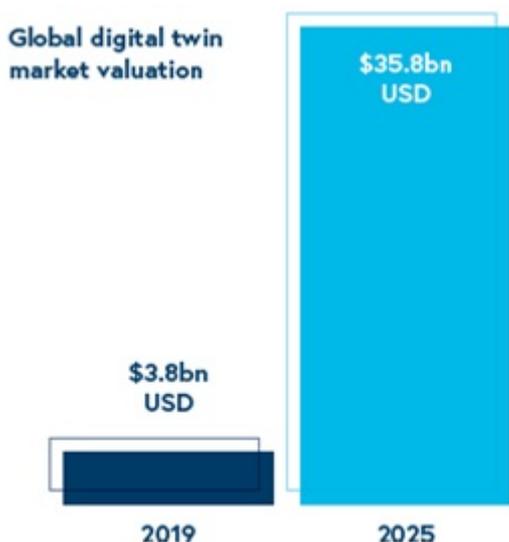


Рис. 4. Цифровые близнецы быстро становятся воспринимаемыми как инженерами, так и экономистами [26].

Мировой рынок цифровых двойников был оценен в 3,8 млрд. долларов США в 2019 году и, как ожидается, достигнет 35,8 млрд. долларов США к 2025 году. Ожидается, что половина всех крупных промышленных компаний будет использовать их в той или иной форме к 2021 году, что, как ожидается, приведет к 10% увеличению эффективности [26].

Хотя полностью отвечающая требованиям автоматизированная целостная система в настоящее время является далекой целью, строительная отрасль уже поставляет легко адаптируемые стартовые элементы формализованного BIM (IFC), которые могут быть соединены с помощью онтологий [10,16,17,18,19]. Даже эти небольшие шаги повышают ценность, и по мере совершенствования технологий и методов мы прогнозируем сближение этих отдельных частей и появление гораздо более полных, связанных друг с другом близнецов, в конечном итоге движущихся к сетям взаимосвязанных моделей цифровых близнецов для целых стран.

Цифровые близнецы обещают более эффективную разработку активов, выполнение проектов и операций с активами. Динамически интегрируя данные и информацию в течение всего жизненного цикла активов, они обеспечивают кратковременный и долгосрочный рост эффективности и производительности. Близнецы - это не просто BIM или 3D-модель, это ресурс данных, который может улучшить проектирование новых активов и понимание существующего состояния активов, проверить текущую ситуацию, выполнить моделирование и сценарии «что если» или предоставить цифровой снимок для будущих работ. Это может значительно сократить количество ошибок и разрывов, присутствующих в более традиционных методах управления активами и информацией.

В завершение этой части статьи приведем небольшой обзор знаковых публикаций 2019 года на

тему цифровых двойников. Мы подбирали материалы, которые были опубликованы компаниями уже имеющими прочную репутацию в их основном бизнесе, за единственным исключением британской системой Catapult, имеющей блестящую репутацию практической помощи в реализации инноваций.

DHL давно выпускает материалы о применении цифровых технологий на транспорте и в логистике и в 2019 году также это сделал, и, может быть впервые, не опередив всех на несколько лет по теме цифровых двойников [22], иллюстрации из него были опубликованы в работе [28]. Но этот очень красочный выпуск про цифровые двойники, транспорт и логистику DHL стоит прочитать. Сегодня и технологические компании являются участниками работы с инновациями и особенно теми которые обещают ускорение внедрения и следовательно окупаемости проектов. Именно про виртуальное тестирование с помощью цифровых двойников рассказывает работа [22] выпущенная одним из лидеров рынка старых технологий АВВ. Эта работа про то как на цифровых двойниках проводить виртуальные симуляции и испытания. Сегодня такая технология с использованием цифровых двойников позволяет в разы сократить сроки выхода технологических инноваций на рынок и существенно сэкономить средства. При этом показатели техники, такие как безопасность и надежность также могут быть улучшены по отношению к старым подходам, так как есть возможность рассмотрения гораздо большего числа вариантов и сценариев.

Однако АВВ волнует не только испытания - она разрабатывает методы применения цифровых двойников при обслуживании, как морских судов, так и береговой инфраструктуры. На рисунке 5 показаны строительные блоки инфраструктуры цифровых двойников для этих целей.

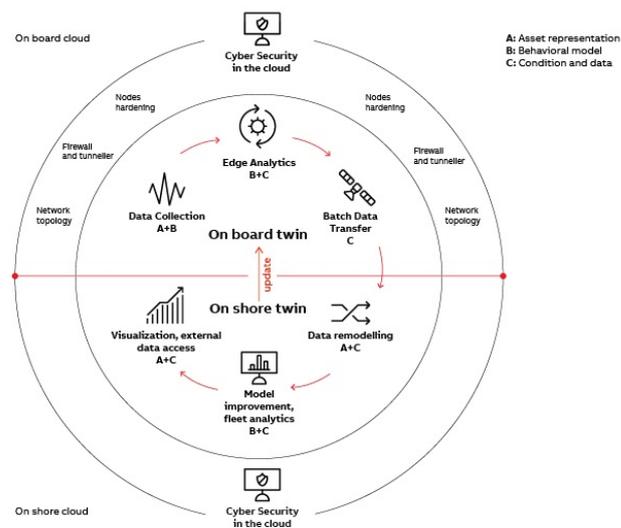


Рис. 5. Строительные блоки инфраструктуры цифровых двойников для морских судов и береговой инфраструктуры (источник - АВВ <https://new.abb.com/news/detail/24663/your-systems-may-be-optimized-but-digital-twins-could-learn-to-do-it-better>)

Наиболее близким текстов к теме BIM и цифровые двойники является работа ARUP [23], на которую мы уже ссылались выше. Приведем для иллюстрации позиции компании рисунок 6, о том, как выглядят цифровые двойники в жизненном цикле зданий и сооружений на базе BIM, а также города.

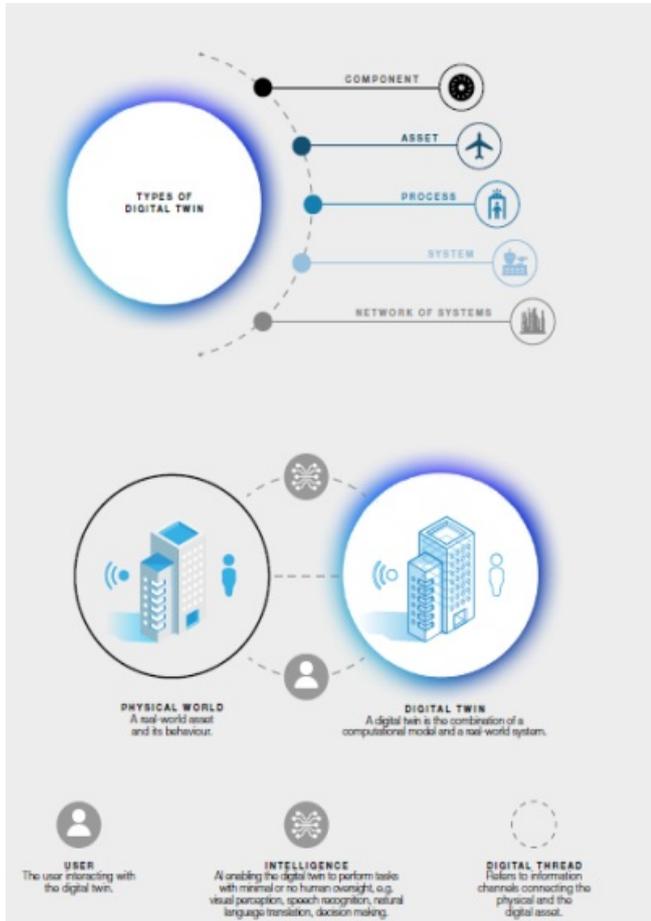


Рис. 6. Общее представление ARUP о том, как выглядят цифровые двойники в жизненном цикле зданий и сооружений на базе BIM [24].

Британский ускоритель инноваций со звучным названием Catapult связывает понятия AR/VR (иммерсивные технологии) с цифровыми двойниками [25], к которым мы и переходим. В исследовании [25] отмечается, что определить архитектуру для цифрового близнеца сложно, так как существует большой потенциал разнообразия в зависимости от варианта использования как написано в этой работе от Catapult. Но обобщенная архитектура цифрового близнеца ими предложена и показана на следующем рисунке 7.

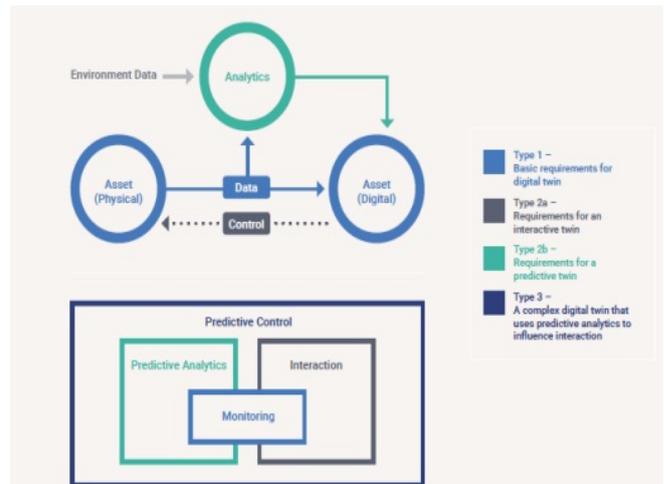


Рис. 7. Обобщенная архитектура цифрового двойника [25]

III. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ И СМЕШАННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ

Смешанная реальность (англ. Mixed reality, MR), иногда называемая как гибридная реальность [29], впрочем, широко применяется также термин иммерсивные технологии [24], и все это охватывает более приземленные наличием конкретных устройств дополненную реальность и виртуальную реальность. Последние являются следствием объединения реального и виртуальных миров для создания новых окружений и визуализаций, где физический и цифровой объекты сосуществуют и взаимодействуют в реальном времени. В случае технологий BIM, это очень естественный синергетический союз, уже имеющий очень успешные коммерческие реализации. Но в случае цифровых двойников смешанная реальность на наш взгляд становится огромной новой системой для человека новых видов массовой информации (иммерсивные спектакли, кино и телевиденье), развлечений и путешествий (игры и туризм), а самое главной средой обучения и работы.

При этом понятие смешанной реальности существует не только в реальном или виртуальном виде, [29] а как смесь реальной и виртуальной реальности, охватывает дополненную реальность и виртуальную реальность. При этом степень замыкания может варьироваться, как программно, так и аппаратно.

На рисунке 8 ось виртуальности (слева-направо) и ось медиальности (снизу вверх) представляет континуум опосредованной реальности. Здесь показаны четыре примера точек: дополненная реальность, дополненная виртуальность, опосредованная реальность, и опосредованная виртуальность на виртуальной и медиальной осях. Это включает, например, сниженную реальность (то есть компьютеризированный шлем, который отфильтровывает или снижает отдельные части сцены).

Технология виртуальной реальности (VR), фактически, позволяет покрыть предыдущий пробел в архитектурной коммуникации, позволяя увидеть результат до его завершения с помощью реалистичной и захватывающей симуляции проекта. Оказывается крайне

востребованной в BIM технологиях, создавая, фактически, рабочие места нового типа и имеет множество применений.

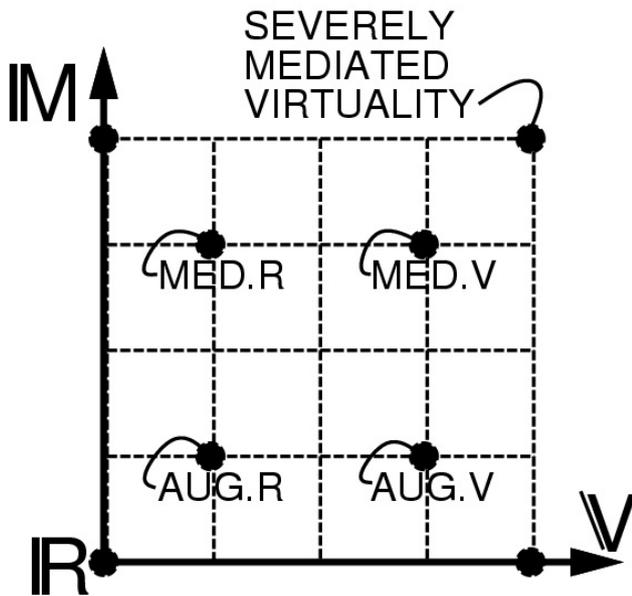


Рис. 8. Смешанная реальность - возможности вариаций от AR до VR [29].

Технология виртуальной реальности (VR) накладывает компьютерное изображение, чтобы дать пользователю представление о реальном мире и, таким образом, обеспечивает составное представление, которое изолирует сенсорные рецепторы пользователя (глаза и уши) из реального физического мира [29].

Хорошую подборку примеров применения AR/VR для транспортных инфраструктур можно найти в [15], а дополнения по логистике можно найти в [32], поэтому сосредоточимся на их применении в жизненном цикле инфраструктур. В источниках [34-43] мы подобрали существенные публикации про рынок и применения этих технологий в строительстве. Мы приведем далее краткий обзор их применений.

VR используется в строительной отрасли для многих применений, таких как проектирование и визуализация совместной работы, а также в качестве инструмента для улучшения строительных процессов. VR формирует хороший маршрут для проекта инфраструктуры, поскольку он обеспечивает 3-D визуализацию, которой можно манипулировать в реальном времени и использовать совместно, чтобы исследовать этапы строительного процесса. Напротив, для VR, дополненная реальность (AR) создает среду, в которой пользователь накладывает компьютерный вид реальной сцены. AR состоит из живой, подражательной версии реального мира - со способностью добавлять определенные элементы к моделируемому ландшафту. AR сохраняет осведомленность пользователя о реальной среде путем объединения реального мира и виртуального содержания и уже используется в решениях для планировок инфраструктуры инфраструктур – современных городов [30, 31].

Система VR/AR, обычно называемая аппаратными компонентами, программным обеспечением и алгоритмами, имеет различные применения в строительной и инфраструктурных отраслях. Сегодня полевые работники и руководители проектов проявляют большой интерес к использованию технологий VR / AR во время этапа строительства в основном для мониторинга прогресса и выявления дефектов или столкновений в размещении работы. Выделяется применения AR в восьми рабочих заданиях строительного проекта: планировка, земляные работы, позиционирование, проверка, согласование, надзор, комментирование и разработка стратегий. Технология VR/AR может быть интегрирована с BIM, чтобы создать бесшовное взаимодействие между дизайном и строительными работами. Исследователи показывают, что VR/AR позволяет пользователям находить разницу между 3-D моделью в заданном виде и построенным объектом. Другие исследователи осуществили система визуализации показателей эффективности для представления отклонений прогресса наложением 4-D запланированных моделей на фотографии реального времени.

Многие приложения VR/AR фокусируются на безопасности конструкции, которая включает планирование безопасности (например, идентификация опасности), обучение и образование в области безопасности, а также проверка и инструктаж по технике безопасности.

Хотя технологии VR/AR имеют несколько приложений для улучшения производительности строительства и получили значительное внимание в научных сообществах, эти технологии до сих пор относительно новые в транспортно-строительной отрасли. На самом деле, часто говорят, что до сих пор строительная отрасль лишь «баловалась» использованием VR/AR для содействия строительству. Однако, поскольку на рынке появляются более дешевые и качественные 3-D варианты, многие ожидают, что технологии VR/AR будут быстро расти в использовании в строительных проектах в ближайшем будущем.

Приведем некоторые практические примеры, следуя [44]. Так Trimble Connect - это облачная платформа для совместной работы над проектами, предназначенная для строительства. Заинтересованные стороны проекта могут обмениваться, комментировать и управлять актуальными проектными документами, фотографиями, чертежами и моделями на различных этапах рабочих процессов (рисунок 8). Эта информация может быть легко доступна через настольные, веб- и мобильные инструменты, в зависимости от роли или задач соответствующего человека [44].

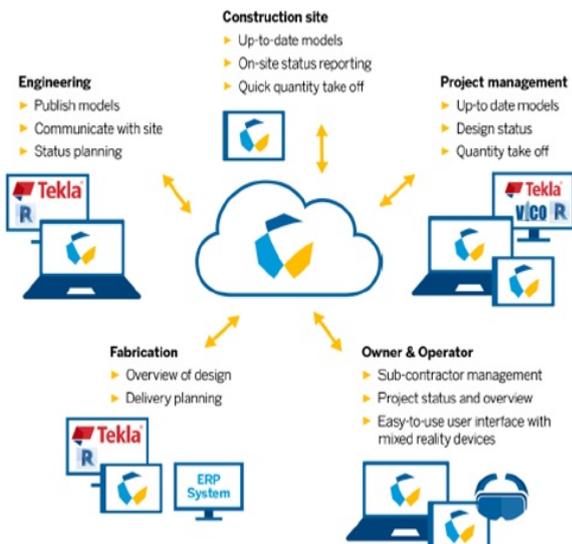


Рис. 9. Возможности Trimble Connect в различных сферах деятельности [44].

На рисунке 9 показано взаимодействие между различными участниками процесса строительства, а также то, что нужно клиенту для этой платформы.

Мобильное приложение предназначено для профессионалов, работающих в режиме удаленного доступа или на месте (например, на объекте строительства на стройплощадке или в проекте для встреч или презентации). Задачи, которые были назначены в офисе с помощью Trimble Connect для Интернета или рабочего стола, могут быть выполнены одним щелчком мыши для организации доступа к конкретной информации, необходимой для этого. Данные проекта и файлы могут быть использованы через мобильное приложение в автономном режиме, когда нет доступа в Интернет. Таким образом, новые задачи, называемые задачами, можно создавать и редактировать в автономном режиме, а затем синхронизировать после подключения к Интернету.

Trimble предлагает технологии смешанной реальности для клиентов в области проектирования, строительства, архитектуры, горного дела, геопространственных, природных ресурсов и эксплуатации объектов. Одним из продуктов является Trimble Connect для HoloLens. HoloLens (Microsoft HoloLens) - это интеллектуальные очки смешанной реальности (рисунок 10), разработанные Microsoft, которые позволяют взаимодействовать с цифровым контентом и голограммами. Это дает возможность работать с продвинутым 3D-дизайном, координацией, сотрудничеством и управлением проектами [44].

Устройство представляет собой «компьютер без проводов», надетый на голову. Внутри находятся центральный и графический процессор, голографическая микросхема, способная обрабатывать терабайты информации от детекторов: инерциальный измерительный блок, включающий акселерометр, гироскоп и магнитометр, датчики, широкоугольную глубинную камеру, фотографию - видеокамера, а также набор микрофонов и датчик освещенности. Все эти

технические возможности и программной обеспечение с правильно организованной информацией создают интеллектуальный экзоскелет работающего человека в жизненном цикле инфраструктур с использованием BIM.



Рис. 10. Microsoft HoloLens [44].

Компания Dalux является разработчиком в Дании технологии BIM и цифровых инструментов для подрядчиков, строителей и консультантов в интересующем нас направлении. Помимо Дании, у компании есть клиенты, как в скандинавских странах, так и за рубежом, особенно в Великобритании и Германии [44].

Пакет продуктов Dalux содержит бесплатное средство просмотра BIM для устройств Apple iOS и Android, в первую очередь обеспечивающее облачный доступ к 3D-моделям и 2D-чертежам для клиентов. Другими продуктами, которые можно приобрести у Dalux, являются мобильный инструмент контроля качества (Dalux Field), система управления документами (Dalux Box), а также система FM (Facility Management) (DaluxFM) [44].

Dalux имеет такую технологию AR, как TwinBIMTM, которая совместима с Google ARCore и инструментарием iOS ARKit для создания инструмента AR BIM на смартфонах (рисунок 11). Она позволяет пользователям видеть элементы 3D-модели, наложенные на видеоизображения в реальном времени, созданные камерой устройства, а затем приложение можно использовать для создания рабочих процессов, в которых, например, могут быть расхождения между моделью и созданными компонентами [44].

На рисунке 11 рабочий-строитель использует TwinBIMTM, сканируя окружение и помещая модель BIM в созданную 3D-карту и выравнивая их с учетом сложившейся обстановки.

Мы привели эти примеры выше, чтобы показать то, что BIM, соединенный с расширенной реальностью, выходит из здания в поле на строительную площадку и меняет характер рабочих мест, и вся система, построенная на нем, становится оперативно реагирующей на строительные и впоследствии на эксплуатационные работы.



Рис. 11. Дополненная реальность от Dalux на строительной площадке [44].

Однако необходимо помнить, что любая технология, а тем более такие «энергоёмкие» в ИТ смысле как BIM и смешанная реальность требуют и правильного распределения вычислительных мощностей и широкополосной мобильной связи с необходимыми характеристиками.

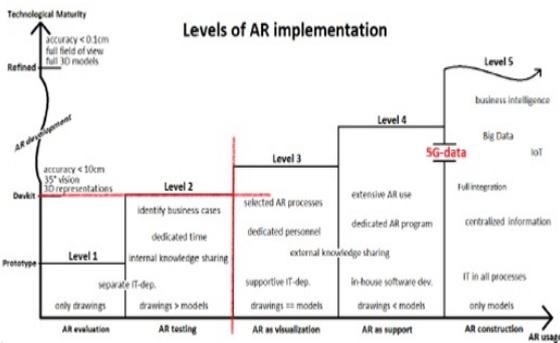


Рис. 12. Дорожная карта для реализации, которая позволяет менеджерам оценить свою организацию в части возможностей использования AR [45].

На рисунке 12 мы привели эту ситуацию в виде дорожной карты для реализации, которая позволяет менеджерам оценить свою организацию в части возможностей использования AR. Ключевая точка в этой дорожной карте – технология 5G.

IV. ТЕХНОЛОГИИ 5G и IoT - ДВЕ ОПОРЫ ЦИФРОВЫХ БЛИЗНЕЦОВ.

Мы подобрали рисунки 1, 3, 5, 6, 7, 9, что бы показать нарастающий двухсторонний обмен данными между измененным с помощью устройств IoT физическим миром и его цифровым двойником. Технологии смешанной реальности ставят человека при необходимости внутрь этих потоков, предоставляя работающему оптимальные форматы для понимания происходящего и активного участия. Все это

предполагает мобильную, широкополосную и низкой латентности связь, стандартом которой сегодня фактически стала 5G [46,47]. Более развернутые технические ожидания от 5G представлены на рисунке 13.

Peak Data Rate	1 - 20 Gbps	Connection Density	10k - 1m devices / km ²	Reliability	99.999% (of packets)
User Experienced Data Rate	10 - 100 Mbps	Network Energy Efficiency	x1 - x100	Position accuracy	10m - <1m
Spectral Efficiency	x1 - x3	Area Traffic Capacity	0.1 - 10 Mbps / m ²	Security	Strong subscriber authentication, user privacy and network security
Mobility	350 - 500 km/h	Availability	99.999% (of time)		
Latency	1 - 10 ms	Battery life	10 years*		

Рис. 13. Технические ожидания от 5G (Источник Ericsson)



Рис. 14. Трансформация M2M в IoT (Источник Ericsson)

Вообще говоря, 5G - это невероятно быстрые скорости, более высокий уровень надежности и увеличенная емкость. С точки зрения бизнеса, 5G обеспечивает значительные улучшения процессов и управления данными. Для таких действий, как сбор, сбор и анализ / оценка данных, которые все более важны для реализации проекта, ключевым фактором является возможность подключения. А с 5G они выполняются в режиме реального времени, поэтому решения могут приниматься практически мгновенно, а проблемы быстро устраняются. У 5G есть большой потенциал, чтобы изменить ситуацию в управлении активами построенными на базе цифровых близнецов и BIM на всем жизненном цикле. Технические характеристики 5G позволяют сделать использование BIM и смешанной реальности повсеместными (рисунки 12 и 13), а Трансформация M2M в IoT создает основу для обратной связи по данным для цифровых близнецов (рисунок 14) так как перестает быть точечной и позволяет говорить об онтологической прозрачности и уже реализовывать ее в рамках европейских онтологических стандартов IoT, принятых в 2019 году [49]. Это первые такого рода стандарты, которые пригодны для построения мультидоменных онтологий цифровых двойников.

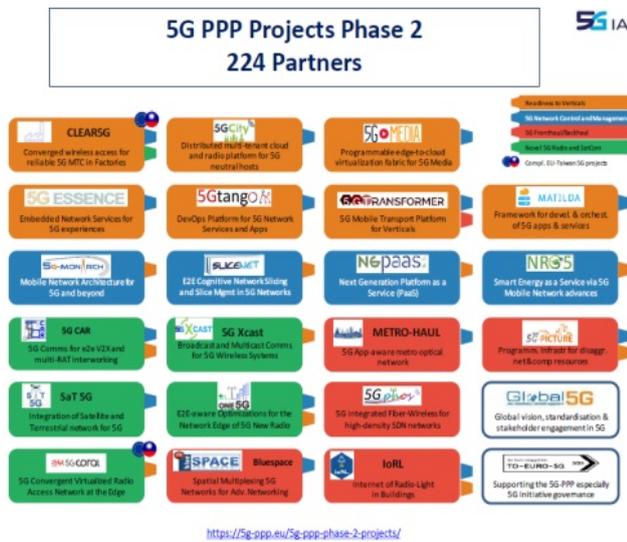


Рис. 15. 224 партнера по проектам ЕС на фазе 2 5G PPP (источник - 5GIA)

Работы ЕС и проекты по 5G носят чрезвычайно широкий характер и включают огромное количество партнеров практически из всех стран: Китай, Индия, Бразилия, Япония, южная Корея и т.д. (рисунок 15). На рисунке 15 собраны названия и характеристики 2 фазы 5G PPP из 3-х. Сегодня проходит уже третья фаза, и она же последняя, суть которой в тестировании решений.

Масштабное тестирование построено по принципу вертикальных отраслей проводится ассоциацией инфраструктуры 5G (5G-IA) в рамках проектов ЕС .PPP инфраструктуры 5G - это амбициозная программа (3 этапа) с амбициозными KPI и 5G Infrastructure PPP - это больше, чем группа автономных проектов. Она включает:

Модель предварительного структурирования (PSM)

Обеспечение совместной работы правильного набора проектов (портфолио)

Внутрифазные и сквозные этапы (более 90 проектов в полной программе)

Модель PSM представляет особенности и рекомендации, чтобы гарантировать плавность интеграция новых проектов в существующую согласованную программу и ориентирована на портфель проектов Фазы 3. II ГЧП и связанные проекты, а не на предложения. Модель не предписывающая (в том числе по технологиям) но, определяющая рекомендации с точки зрения 5G-IA, и дополненная взаимодействием с общим сообществом. Дорожная карта общеевропейских практических испытаний ЕС 5G приведена на рисунке 16.

Возможности реализовать потребности в цифровых близнецах обусловлена также технологией IoT, которая позволяет реализовать понимание состояния физического мира и его объектов. До сих пор работа в области IoT была ориентирована на устройства - все занимались разработкой устройств и выясняли, как они могут наилучшим образом общаться друг с другом и передавать данные. Тем не менее, все чаще те, кто использует технологию IoT, теперь сталкиваются с

организацией этих устройств в реальных физических пространствах. Почему один датчик больше подходит для одного района здания? Почему система IoT настроена так, как она есть [48]?

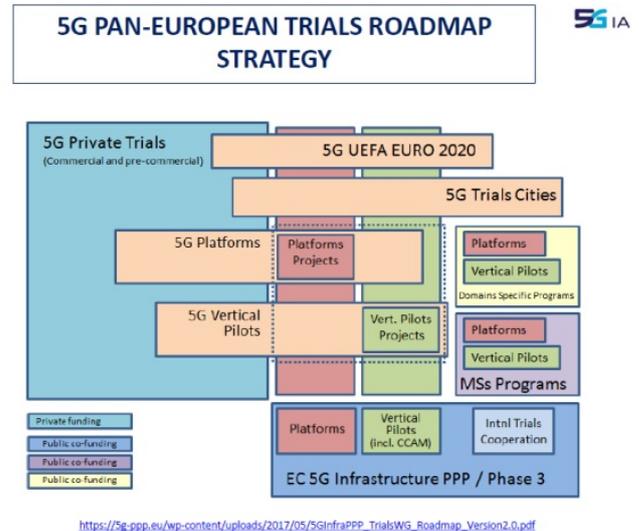


Рис. 16. Дорожная карта общеевропейских практических испытаний ЕС 5G (источник - 5GIA)

В публикации [49] приводится обзор новых европейских онтологических стандартов IoT, которые фактически создают часть условий, в которых появляются цифровые близнецы. Следующим этапом в IoT является не просто установка системы датчиков, а возможность виртуального представления физического мира с помощью цифрового близнеца, который моделирует отношения между людьми, устройствами и самим пространством [48].

Стоит согласиться с [48], что «75% организаций, внедряющих технологию IoT, уже используют цифровых близнецов как часть своей системы или планируют сделать это в течение года. Один из примеров, который использует представитель Azure - это программирование термостата. Если вы хотите измерить и поддерживать температуру офисного здания, например, движение и количество людей внутри него будут играть большую роль в этом. Цифровой близнец может помочь вам отобразить эти изменения».

По данным Gartner, 75% организаций, внедряющих технологию IoT, уже используют цифровых близнецов как часть своей системы или планируют сделать это в течение года. Исследовательская и консультационная компания считает это свидетельством того, что технология стала господствующей тенденцией - несмотря на то, что 75% делятся на 13%, которые в настоящее время используют технологию, и 62%, которые планируют это сделать [48].

Физический близнец отражается в цифровом двойнике с помощью развивающейся технологии IoT. Такие факторы, как климат и движение, могут отслеживаться датчиками и отображаться в экосистеме цифрового близнеца, чтобы создать максимально

точную и реалистичную копию. Почему именно вы хотите иметь отзывчивую копию реального актива?

Хорошо, когда цифровые близнецы превосходят как технология, это способность учитывать контекст существующих структур алгоритмов и данных. Как только близнец будет точно создан, можно проводить цифровое моделирование, которое может предотвратить проблемы, возникающие в физическом близнеце, в то время как изменения могут быть опробованы с помощью цифрового близнеца и возвращать «реалистичные» результаты.

В конце 2019 вышел объемный труд с интересным названием “5G: Будущее IoT” [50]. Для иллюстрации связей обсуждаемых технологий мы приводим рисунки 17 и 18.

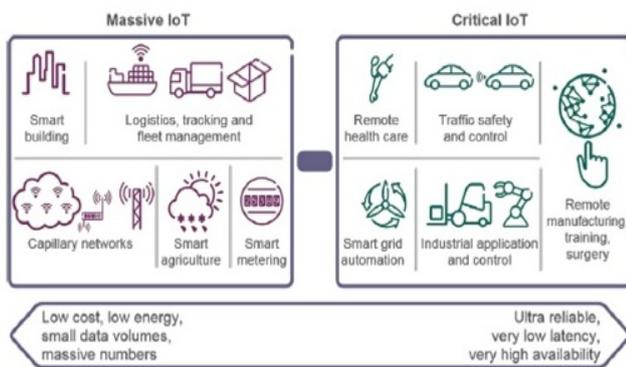


Рис. 17. Различные требования для массовых и критических IoT-приложений, связанных с цифровыми близнецами [50].

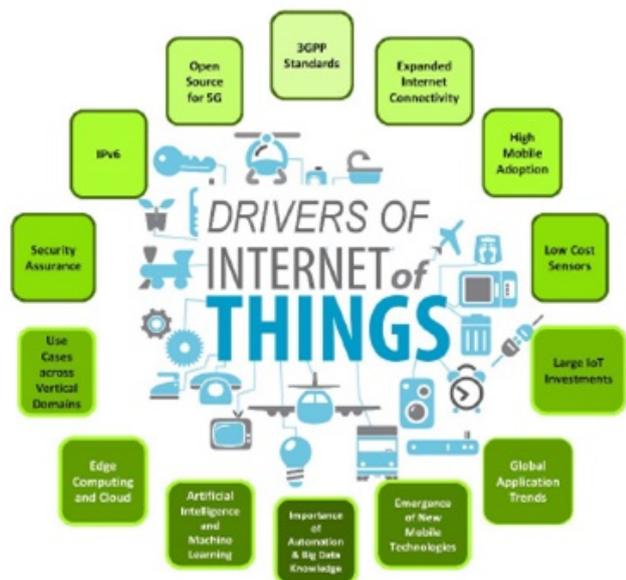


Рис. 18. Драйверы и тенденции рынка IoT, ведущие к цифровым близнецам [50].

Для иллюстрации сказанного выше приводим цитату из одного из исследовательских вертикальных проектов ЕС из PPP инфраструктуры 5G [51], о которых мы говорили выше:

«AR с технологией 5G-MoNArch позволит

инженерам-инспекторам наблюдать за строительством прогресс с наложенным изображением соответствующих планов сайта. Этот более эффективный процесс позволяет чаще инспекции и возможность выявить отклонения от плана на более ранней стадии с последующей экономией на общей стоимости.

В настоящее время в строительной отрасли проводится множество инноваций. Главным из них это принятие методов информационного моделирования зданий (BIM). Это включает в себя представление строительных чертежей в виде трехмерных (3D) пространственных записей, которые позволяют:

- Визуализация 3D рисунков
- Многоуровневые данные для иллюстрации этапов строительства и выделения конкретных строительных услуг
- Связь просматриваемых изображений с основными техническими деталями и спецификациями»

Эта работа проводит исследования по использованию технологии VR / AR в планировании проектов для поддержки BIM и приводит расчетные потенциальные экономические выгоды в таблице 1.

Таблица 1 Потенциальные экономические выгоды от AR в строительных проектах (€) [51].

V. ТЕХНОЛОГИИ ОНТОЛОГИЙ КАК КОМПОНЕНТЫ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

В предыдущих разделах мы уже говорили об онтологических стандартах. Мир стандартизации инфраструктур, усилиями рабочих групп открытого онтологического международного общества стандартизации buildingSMART, в деятельности которого принимает с недавних пор Россия, сегодня меняется очень быстро. По сути, BIM - это процесс, позволяющий сэкономить время и деньги и достичь высокого уровня достоверности результатов, как в процессе проектирования и строительства так и, что особенно важно, на процессе эксплуатации. Например, реконструкция (реновация) зданий и сооружений управляемая данными заложенными в BIM модель может дать замечательные результаты по снижению затрат и повышению комфортности или иных бизнес свойств сооружений [19]. Даже снос зданий может быть в этом цифровом мире BIM рассчитан и пройти по оптимальному сценарию, как для экологии, так и для экономики.

Все это собственно и называется жизненным циклом зданий и сооружений. Трехмерная модель, сгенерированная во время процессов проектирования BIM которую, к сожалению, очень многие считают некоторой основой технологий BIM, является побочным продуктом необходимости координировать конкретный дизайн, фиксировать структуру как есть для оценки затрат на снос или предоставлять юридическую или договорную запись об изменении физического актива. Такая визуализация может быть очень полезной частью процесса, поскольку она помогает людям понять динамику, характеристики и эстетику предлагаемого

проекта, но не представляет весь процесс.

По ряду причин IFC как формализованная онтология и buildingSMART как некоммерческая международная организация стали синонимами открытого BIM (но это не единственное решение), особенно после того как начали развитие IFC для линейных и площадных инфраструктурных объектов и заключили для этого значительное количество соглашений со смежными некоммерческими онтологическими обществами. В результате понятие BIM и IFC стали очень близкими онтологическими доменами, что можно наглядно увидеть на рисунке 19, определив основные направления мировой стандартизации (рисунок 20), в которой сегодня выделилось действительно мощное понятие данных, необходимых для тех или иных этапов жизненного цикла зданий и сооружений, а также повышения их потребительских свойств и экономических показателей.

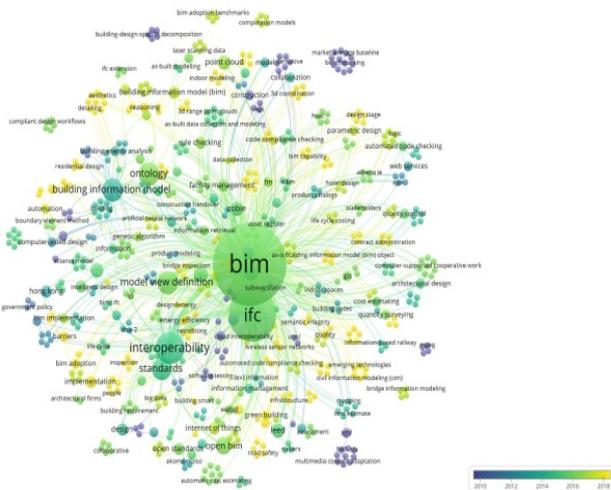


Рис. 19. Домены BIM и IFC стали почти совпадающими (источник: Sara Guerra de Oliveira Open BIM for infrastructure: Recent standardisation efforts ISO/TC 211 Seminar “Standards in Action” 5th June, 2019 University of Maribor: Faculty of Electrical Engineering and Computer Science SLOVENIA)

Чтобы BIM (IFC) стал операционно исполняемым и как модель мог стыковаться с моделями на других онтологических языках программирования необходимо то что будет их связывать как по коду так и по значениям семантики данных. Самой распространенной практикой сегодня является использование средств поддерживаемых W3C, таких как OWL (онтологический веб язык).

После того как buildingSMART стал выпускать зеркальную к IFC версию IFCOWL, возможности соединения, выравнивания моделей и, соответственно, данных существенно возросли, что собственно и позволило взяться за одновременную работу по большому числу направлений или комнат в целях расширения языка в том числе через OWL.

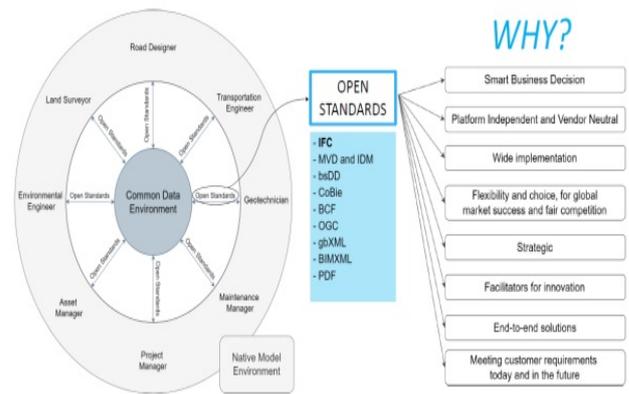


Рис. 20. Направления стандартизации BIM и IFC по решениям CDE (источник: Sara Guerra de Oliveira Open BIM for infrastructure: Recent standardisation efforts ISO/TC 211 Seminar “Standards in Action” 5th June, 2019 University of Maribor: Faculty of Electrical Engineering and Computer Science SLOVENIA)

Формализованная онтология позволяет организовывать связи между различными доменами, которые ранее не были связаны по многим причинам и в том числе из-за невозможности технически выполнить эту работу. Однако когда появились возможности совсем по-другому организовать, как хранение данных, так и их поиск, спектр применения технологий BIM начал расширяться, как по предметным областям (доменам) так и по временной шкале, что, собственно, и дало возможности buildingSMART начинать обсуждать с партнерами построение цифровых близнецов, используя свои стандарты и большое число созданных в мире онтологических блоков (рисунки 21,22,23).

Digitizing the Built Asset Industry



Рис. 21. Дигитализация, потоки информации и онтологии в индустрии создания и управления активами (источник - Richard Petrie Chief Executive buildingSMART International 2019)



Рис. 22. Основные лнтологические домены, с которыми взаимодействует BIM (источник - Richard Petrie Chief Executive buildingSMART International 2019)

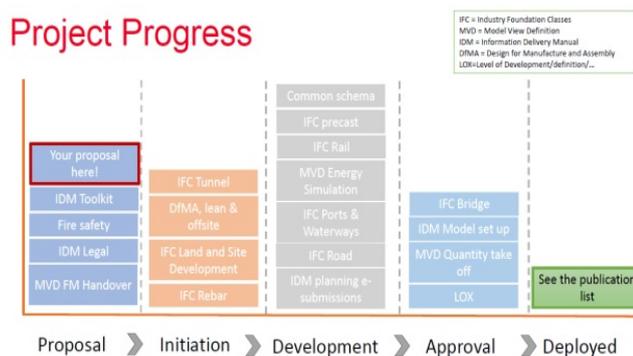


Рис. 23. Как выглядит конвейер подготовки стандартов на инфраструктуры в buildingSMART (источник - Richard Petrie Chief Executive buildingSMART International 2019)

В конце 2019 года buildingSMART International и компания Bentley подписали примечательное соглашение [52], в пресс-релизе о котором есть очень ясно выраженные позиции о цифровых близнецах двух сторон [52]:

«Бхупиндер Сингх, директор по продуктам Bentley, сказал: «Bentley стремится поддерживать лучшее внедрение IFC для цифровых близнецов. Мы стремимся к открытости, и на самом деле мы планируем открыть iModel Bridge с открытым исходным кодом для IFC. Сочетание поддержки IFC и принципов открытого исходного кода должно дать сообществу уверенность в том, что они могут создавать и курировать цифровых близнецов, не подвергаясь влиянию темных данных».

Ричард Петри, генеральный директор buildingSMART International, сказал: «Я рад, что Bentley присоединился к buildingSMART International. Являясь одним из

основных поставщиков программного обеспечения в нашей области, Bentley играет важную роль в нашем сообществе. Видение, которое Bentley предлагает для iModels и Open Source, предлагает сообществу IFC захватывающие новые возможности для открытых взаимодействующих способов работы с цифровыми близнецами».

VI. КАК СЕВЕРНЫЕ СТРАНЫ ЕВРОПЫ ДВИГАЮТСЯ ОТ INFRABIM В СТОРОНУ ЦИФРОВЫХ БЛИЗНЕЦОВ

Северные страны Европы: Финляндия, Швеция, Норвегия и Дания обладают очень сильными позициями в области технологий BIM жизненного цикла и управления активами. Не случайно много руководителей и экспертов глобальных структур стандартизации (комнат) buildingSMART International происходят именно из этой области Европы. На региональном уровне они подтягивают в эту орбиту своих соседей Балтийскому морю. Так как основные усилия buildingSMART International в стандартизации направлены на инфраструктуры: железных и автомобильных дорог, мостов, туннелей, аэропортов, водных портов и гаваней, то эти страны стремятся к практическому внедрению этих стандартов даже до их официального принятия, становясь тем самым важным источником революционного опыта и источником новых стандартов и дополнений к ним. Именно там возник новый термин INFRABIM, который сегодня по большей части касается инфраструктур железных и автомобильных дорог. Выпущены Building SMART Finland уже несколько фундаментальных работ, из которых мы остановимся на [53,53].

Работа [54] уже выпущена совместно с Nordic Road & Rail BIM Collaboration (северное авто и железнодорожное BIM сотрудничество) и посвящена крайне важной теме как всеобщие онтологические решения и семантические принципы построения информационных систем, крайне серьезно отличающиеся от иерархических кардинально изменяют построение классификационных систем в строительстве и управлении активами. Не смотря важность этой темы и то, что она, по мнению [53], один из столпов InfraBIM, мы сосредоточимся на изложении [53] как более общему документу. В нем сказано, что требования к моделированию, классификация и форматы составляют три столпа управления информацией. Каждый из этих компонентов должен быть в порядке и унифицирован для правильной работы управления информацией. Требования InfraBIM также предназначены для использования в качестве технических справочных документов при закупках (рисунок 24).

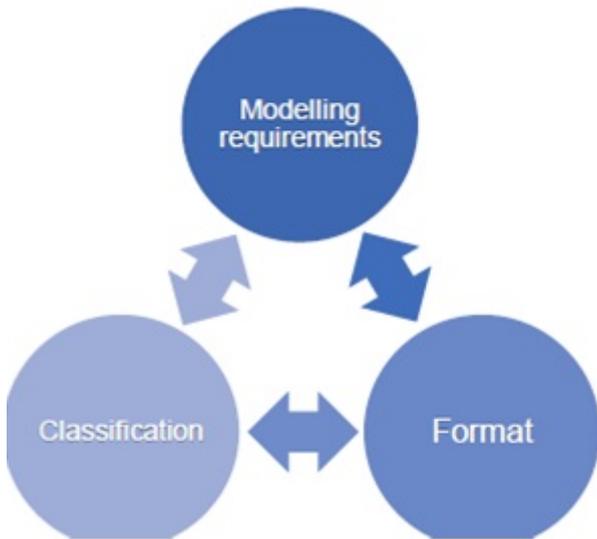


Рис. 24. Три столпа управления информацией: общие требования InfraBIM, классификация InfraBIM и спецификации для форматов обмена данными [53].

Общие требования InfraBIM охватывают весь жизненный цикл инфраструктурного проекта: исходный материал, различные этапы проектирования, строительства, сборку документации и, в будущем, эксплуатацию и обслуживание. Руководство по моделированию направлено на то, чтобы направлять, гармонизировать и улучшать методы моделирования во всем секторе инфраструктуры. Руководящие принципы основаны на текущей наилучшей практике и будут регулярно обновляться по мере развития знаний и инструментов.

В Общих требованиях к InfraBIM выделены разделы требований и руководящих указаний, чтобы подчеркнуть их важность в тексте. В разделе требований представлены минимальные требования к моделированию и содержанию данных моделей. Считается, что соблюдение этих указанных минимальных требований необходимо во всех инфраструктурных проектах. В разделе руководящих принципов представлены методические рекомендации, которые рекомендуется использовать в проектах, но которые не являются абсолютными минимальными требованиями.

Причиной того что мы пока не считаем целесообразным обсуждать будущее классификации InfraBIM более детально в том что согласно [53] не выработан еще окончательно тезаурус InfraBIM. Так в секторе инфраструктуры термин «информационное моделирование инфраструктуры» используется для информационного моделирования, а информационная модель определенного объекта инфраструктуры называется «информационной моделью инфраструктуры». Неотъемлемой частью инфо-информационного моделирования являются различные типы геопространственной информации (например, о зонировании, окружающей среде и т.д.), которые также можно визуализировать в трехмерных моделях. Моделирование в секторе инфраструктуры может быть расширено, чтобы определить управление информацией

об инфраструктуре в целом.

В строительстве зданий установленное значение информационной модели - это трехмерный план или его часть, разработанная дизайнером. Тем не менее, это определение в настоящее время расширено, чтобы обозначить всю информацию, которая включена в план на основе модели.

Глоссарий терминов InfraBIM содержит понятия, относящиеся к информационному моделированию, но некоторые из них устарели и не соответствуют понятиям, описанным в этих руководящих принципах. Глоссарий терминов InfraBIM будет обновлен в будущем, чтобы соответствовать терминологии этих руководящих принципов. Приведем в качестве примера рисунок 25 модели поверхности и структуры дорожной конструкции, обозначенные в соответствии с классификацией InfraBIM для того чтобы подчеркнуть особенности и отличия InfraBIM от классического BIM. Но эти отличия только начали формализовать.

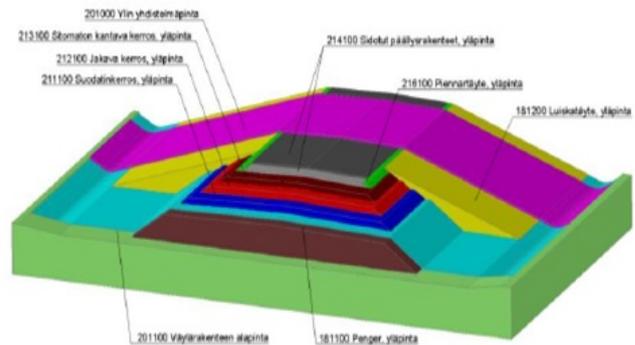


Рис. 25. Модели поверхности и структуры дорожной конструкции, обозначенные в соответствии с классификацией InfraBIM (Источник: классификация InfraBIM v.1.71, buildingSMART, Финляндия)

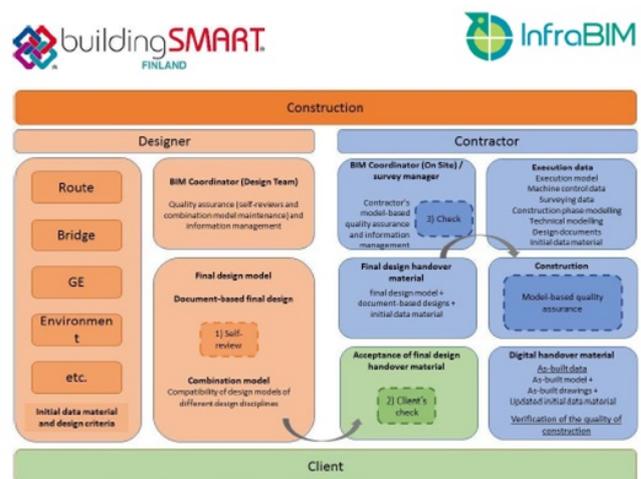


Рис. 25а. Информационный обмен данными, который необходим для выполнения действий на рабочей площадке на основе модели [53].

Рисунок 25а по заложенным взаимодействиям практически совпадает с рисунками 1,3,5,6 и 7, показывающими как строится работа цифровых

близнецов, хотя и относится только к первой фазе отношениям между проектантами, строителями и заказчиком.

Важно подчеркнуть, что развитие InfraBIM Building SMART Finland проходит совместно с их официальными транспортными агентствами. Вот несколько рисунков от Финского агентства инфраструктур для транспорта (Finnish Transport Infrastructure Agency, Tarmo Savolainen), относящихся к статусу открытого BIM в Финляндии (строительный сектор). Рис. 26 представляет нынешнее «торнадо» в кардинальных изменениях BIM, которое должно закончиться вскоре после 2019 года. На рисунке 27 отражены текущие задачи изменений, а на рисунке 28 появляется и цель этих изменений – цифровой двойник.

Status of open BIM in Finland (infra sector)

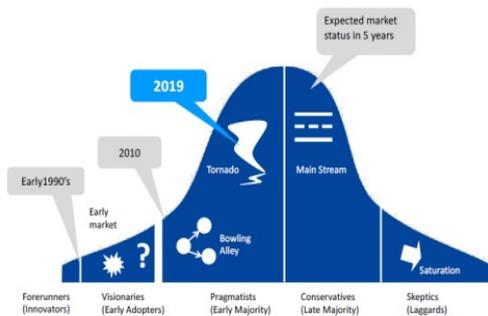


Рис. 26. Этапы перехода к новым принципам и стандартам InfraBIM (источник - Finnish Transport Infrastructure Agency, Tarmo Savolainen)

Digital Built Environment Viewpoints– Next steps



Рис. 27. Ближайшие шаги в сторону InfraBIM (источник - Finnish Transport Infrastructure Agency, Tarmo Savolainen)

Digital Built Environment - Further steps



Рис. 28. Дальнейшие шаги к цифровым двойникам и InfraBIM (источник - Finnish Transport Infrastructure Agency, Tarmo Savolainen)

VII. INFRABIM В ПРОЕКТАХ RAIL BALTICA

Rail Baltica [55] — проект железной дороги стандартной европейской колеи с европейской системой управления движением поездов, которая должна соединить страны Балтии, Восточную (Польша) и Западную Европу.

Согласно проекту, магистраль пройдет через Таллин, Ригу, Каунас, Варшаву и Берлин (а в дальнейшем — продолжение маршрута до Венеции), улучшив, таким образом, сообщение между Центральной и Восточной Европой. Помимо этого, планируется строительство подводного железнодорожного тоннеля между Таллином и Хельсинки, либо в случае экономической неоправданности этого проекта, пуск железнодорожного паромы между городами. Таким образом, Rail Baltica может соединить Финляндию и часть Скандинавии с Западной Европой [55].

Главными целями Rail Baltica является возобновление непосредственной связи стран Балтии с европейской железнодорожной сетью TEN-T[47], включение этого региона в цифровую железную дорогу Евпропы [56] и развитие региональной интеграции. Интеграция железных дорог Эстонии, Латвии и Литвы в транспортную систему Евросоюза позволит увеличить скорость движения поездов, рост пассажиро- и грузопотоков и прибылей.

Эстония, Латвия, Литва и Польша объявили проект одним из своих приоритетов в области развития транспортной инфраструктуры. Решение Европарламента и Европейского совета определило проект Rail Baltica частью панъевропейского коридора развития TEN-T № 1, который включает также автодорожную часть (Via Baltica) и ответвление А на Калининград (Via Hanseatica) [55]. Планируется, что первый поезд из столицы Эстонии Таллина в направлении границы Литвы и Польши по железной дороге европейской колеи Rail Baltica должен отправиться в 2026 году, еще 5 лет уйдет на строительство путей через Польшу до Берлина [55].

В стадии разработки находится проект «Rail Baltica-2», который предусматривает прокладку к 2024—2030 гг. скоростной европейской колеи напрямую (а не по старой широкой колее) от северной Италии до Таллина [55]. Рисунки, иллюстрирующие этот текст - 29 и 30.



Рис. 29. Rail Baltica как часть коридора Северное море – Балтика (источник - Rail Baltica)



Рис. 30. Rail Baltica как часть общеевропейской транспортной системы TEN-T [57].

Есть и технические характеристики этого проекта, которые соответствуют техническим требованиям к железнодорожным коридорам TEN-T в части колеи, сигнализации и управления, размерности платформ и длине грузовых поездов.

В этом смысле [58] Rail Baltica - это новая «быстрая традиционная» смешанная железнодорожная линия, соединяющая Каунас в Литве, Ригу в Латвии и Таллинн в Эстонии и расширение пути из Вильнюса до Каунаса. С общей длиной линии электрифицированного двойного пути ERTMS L2 и построенным по европейским стандартам и датчикам, отвечающие их «Техническим спецификациям на совместимость», с максимальной расчетной скоростью 240 км/ч для пассажирских поездов и 120 км/ч для грузовых поездов.

Совместно финансируемый Европейским союзом и участвующими в нем железнодорожными органами страны, он будет иметь смешанные терминалы, расположенные в Мууге в Эстонии, Саласпилс в Латвии, Каунасе и Вильнюсе в Литве, плюс семь железных дорог и пассажирские станции, расположенные в Таллине, Пярну, Риге, Паневежисе, Каунасе и Вильнюсе, между аэропортами Каунаса и Вильнюса [58].

Проект прошел долгий процесс планирования,

накапливающийся в утвержденном базовом плане коридора и концепции которые были одобрены, как Rail Baltica, так и местными исполнительными органами. Эти концепции проектов были предоставлены местными исполнительными органами в каждой участвующей стране в качестве чертежей с различной степени содержания. Хотя они отвечают требованиям одобрения концепции, они не могут рассматриваться как информационные модели. Они, почти наверняка, содержат информацию, подразумеваемую или конкретную, которая определяет дизайн и эксплуатационные требования к железной дороге [58].

Цитируя [58] надо сказать, что это один из документов разработанной открытой системы документации на BIM (InfraBIM), которая крайне детально и последовательно описывает все детали проектирования и строительства, закладывает основы управления цифровыми и физическими активами и ведет к цифровым двойникам вначале в проекте Rail Baltica, а затем и в системе TEN-T. Конечно, проект испытывает огромное влияние со стороны упоминавшихся альянсов и работ Скандинавских стран.

Организационно в Rail Baltica или RB на самых ранних стадиях проекта был создан Центр Знаний BIM, с поддержкой ЕС, финансово участвовавшего в подготовке начально набора документов BIM для проекта (исполнителем заказа на эти документы был АЕСОМ Испания). За один год объем этих документов вырос, примерно, в полтора раза и изменилось их содержание. Для тех, кто заинтересован в этих документах, мы приводим ссылку на это собрание документов BIM <http://www.railbaltica.org/rb-rail-as-bim-documentation/>.

Основная цель Центра знаний BIM (Управление информацией о зданиях) - рассказать о подходе RB Rail AS к внедрению BIM для глобального проекта Rail Baltica. И при этом, чтобы предоставить дополнительную информацию по этой теме для государственного сектора и цепочки поставок. RB Rail AS, как государственный закупщик, считает своим долгом информировать отрасль и цепочку поставок о своей деятельности в отношении BIM. RB Rail хочет продвигать и показывать пример совместного использования всей информации, связанной с BIM, начиная с ранней стадии разработки.

Полный пакет руководств BIM просмотренный нами в декабре 2019 года (16-12-2019) представляет в сжатом виде довольно большой объем (40 МБ) и содержит все документы, связанные с BIM по проекту.

Содержимое загружаемого пакета BIM RB представлено ниже. Это:

- BIM Руководство
- Информационные требования работодателя BIM (EIR)
- ВЕР шаблон
- Таблицы кодификации и инструкции по применению

Матрица атрибутов объектов BIM
 Матрица LoG объектов BIM и инструкции по применению
 Шаблон TIDP
 Шаблон MIDP
 Шаблон отчета о доставке BIM
 Шаблон QEX
 Шаблон QTO
 Шаблон DataDrop
 Шаблон САПР и инструкции по применению
 Шаблон отчета о проверке столкновения.



Рис. 31. Дорожная карта развития BIM Rail Baltica (источник - Rail Baltica)

Применение BIM в проекте Rail Baltica считается делом первостепенным и в соответствии с утвержденной дорожной картой развития BIM Rail Baltica (рисунок 31). Согласно этой дорожной карте AECOM Испания выбрана для участия в проекте Rail Baltica [57] (сообщение от 13 декабря 2019). Согласно [57] AECOM, ведущая международная компания в области архитектуры, инжиниринга, дизайна, транспорта, устойчивого развития и международного развития, участвует в проекте Rail Baltica (<http://www.railbaltica.org>), разрабатывая детальную стратегию BIM для железнодорожной инфраструктуры Rail Baltica, которая объединит Прибалтика в нынешнюю европейскую железнодорожную сеть.

Для этой работы был выбран офис AECOM в Мадриде, который свяжет Польшу, Литву, Латвию, Эстонию и, косвенно, Финляндию, благодаря своему опыту в методологии BIM (Информационное управление зданиями / Моделирование). Таким образом, они хотят воспользоваться преимуществами цифрового подхода к проектированию, строительству и эксплуатации инфраструктуры.

Опыт испанской команды в методологии BIM будет присутствовать при разработке стратегии и реализации BIM. Планы, процессы и технологии будут детализированы с точки зрения BIM.

Испанская команда AECOM проанализирует потребности и детализирует рабочие процессы доставки BIM и стандартизирует содержание информации для создания «Общей среды данных» и полезной методологии, основанной на данных BIM, для

жизненного цикла инфраструктур проекта Rail Baltica. Кроме того, будет разработан план обучения и обучения в BIM для администрации Rail Baltica и для местной производственной цепочки.

Также по графику этого плана компания Bentley выигрывает роль BIM в проекте Rail Baltica [59] - Bentley Systems выиграла контракт на создание системы поддержки использования информационного моделирования зданий (BIM) на европейском железнодорожном проекте длиной 874 км.

Разработчик проекта RB Rail назначил Bentley для реализации облачной среды общих данных (CDE). Система будет использоваться на этапах проектирования, строительства и эксплуатации новой линии для обмена и обновления технической проектной документации, включая модели, чертежи и другую информацию. Ожидается, что около 370 человек будут использовать систему каждый день на пике строительных работ Rail Baltica [59].

«Digital Rail Baltica так же важен, как и его физическая инфраструктура», - сказал генеральный директор RB Rail Тимо Риихимяки. Использование BIM поможет обеспечить эффективное сотрудничество между людьми, процессами и технологиями, помогая минимизировать переделки, задержки и непредвиденные расходы, сказал он. «На этапе эксплуатации Rail Baltica BIM будет предоставлять всю необходимую информацию компаниям по обслуживанию и управляющему инфраструктурой, чтобы обеспечить бесперебойную, безопасную и экономически эффективную работу Rail Baltica» - добавил он [59].

Итальянская компания разработала «Книгу стилей» для магистрали Rail Baltica [60]. Архитектурное бюро 3TI Progetti [60] создало руководство по архитектуре, ландшафтному дизайну и визуальной идентичности для будущей магистрали Rail Baltica, которая соединит страны Прибалтики с ЕС. Работа состоит из семи томов и является практическим руководством для создания элементов фирменного стиля всего проекта. В соответствии с этим стилем мастерская одного из самых выдающихся архитекторов 21 века Zaha Hadid Architects выиграла конкурс на проект вокзала Rail Baltica в Таллине [61]. Нам представляется, что не смотря на то, что сама Zaha Hadid (о ней смотри https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B0%D0%B4_%D0%B8%D0%B4_%D0%97%D0%B0%D1%85%D0%B0) уже ушла из жизни, этот проект вокзала Rail Baltica в Юлемисте Таллин на рисунке 32 отражает неукротимый цифровой дух Rail Baltica и грядущих в нем цифровых близнецов.



Рис. 32. Вокзал Rail Baltic в Юлемисте Таллин [61].

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровые близнецы открывают совершенно новый способ поиска оптимизации в физических пространствах. Умные здания и инфраструктуры рассматриваются как идеальный образец технологии, а снижение затрат на инфраструктуру через развитие 5G, IoT, BIM, AR, VR облегчает их разработку в сторону цифровых двойников.

Цифровой близнец был устоявшейся концепцией на рубеже 20 и 21 веков, хотя ограничения сдерживали его как достойную инвестицию. Однако в последнее время развитие Интернета вещей (IoT) сделало цифрового близнеца жизнеспособным настолько, что оно оказывает влияние на широкий круг различных отраслей.

В случае умного здания, сооружение не может быть умным без цифрового близнеца, который является программным обеспечением для управления зданием. Следовательно, здание и цифровой близнец - это почти одно и то же: близнецы не могут быть разделены и не могут существовать самостоятельно. В конечном счете, нет никакого способа создать действительно совершенного цифрового близнеца, по крайней мере, пока. IoT-датчики точны, но существует множество факторов, влияющих на любой продукт в любой момент времени, чтобы безупречно отобразить его без труда.

Способность полностью реализовать потенциал цифровых близнецов в различных приложениях и отраслях зависит от доступа и достоверности данных, поступающих в них. Предполагалось, что данные, используемые для взаимодействия между объектами, могут привлечь злоумышленников, которые хотят либо заразить, либо нарушить обмен. Интеграция блокчейна может предложить решение. Высокая пропускная способность и низкая задержка от 5G улучшат сбор данных и доступ к данным в процессе доставки проекта. Повышенная наглядность данных обеспечивает принятие решений на этапе проектирования, помогает минимизировать проблемы и изменения во время строительства и потенциально уменьшает будущие ремонтные работы.

Однако, вспоминая историю развития BIM в цифровую экономику [5,6], нынешняя трансформация BIM в цифрового двойника потребует осознанного и рассчитанного риска при комплексном внедрении в крупных инфраструктурных проектах в России, но

множество выгод (и не только экономических) того стоят.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Куприяновский В.П., Тищенко П.А., Раевский М.А. Средства объективного контроля изменений (строительства) объектов на базе ГИС-моделей ArcReview | № 1 (68) за 2014 год
- [2] Быстрова Ю.А., Куприяновский В.П., Тищенко П.А., Сияглов С.А., Раевский М.А., Липатов С.И., Савельев С.И. Компонентный BIM/GIS-подход к информационному моделированию сооружений. ArcReview | № 2 (73) за 2015 год.
- [3] Куприяновский В.П., Тищенко П.А., Сияглов С.А. Применение комбинированных технологий BIM-ГИС в строительной отрасли для различных категорий заинтересованных лиц: Обзор состояния в мире. № 2 (73) за 2015 год.
- [4] Добрынин, А.П., et al. "The Digital Economy-the various ways to the effective use of technology (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA, and others)." International Journal of Open Information Technologies 4.1 (2016): 4-11.
- [5] Куприяновский В.П., Сияглов С.А., Добрынин А.П. Цифровая экономика. Как достигли успеха? Практический подход к теоретической концепции. Часть 1. Подходы и основные преимущества //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 3.
- [6] Куприяновский В. П., Сияглов С. А., Добрынин А. П. BIM-Цифровая экономика. Как достигли успеха? Практический подход к теоретической концепции. Часть 2. Цифровая экономика //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 3.
- [7] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "The economic benefits of the combined use of BIM-GIS models in the construction industry. Review of the state of the world." International Journal of Open Information Technologies 4.5 (2016): 14-25.
- [8] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "The new five-year plan for BIM-infrastructure and Smart Cities." International Journal of Open Information Technologies 4.8 (2016): 20-35.
- [9] Zamolodchikov D. et al. Comfortable environment and resources for passenger stations in the lifecycle of digital railways assets //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 3. – С. 100-116.
- [10] Sinyagov, Sergey, et al. "Building and Engineering Based on BIM Standards as the Basis for Transforming Infrastructures in the Digital Economy." International Journal of Open Information Technologies 5.5 (2017): 46-79.
- [11] Sokolov, Igor, et al. "Smart cities, infrastructure, and their anti-terrorist stability. The experience of integrating the US anti-terrorism standards and creating software for digital security." International Journal of Open Information Technologies 5.7 (2017): 45-65.
- [12] Куприяновский В.П., Аленков В.В., Климов А.А., Соколов И.А., Зажигалкин А.В. ЦИФРОВАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА – ERTMS, BIM, GIS, PLM И ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ. Современные информационные технологии и ИТ-образование 2017 Том 13 № 3. С. 129- 166.
- [13] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "Smart infrastructure, physical and information assets, Smart Cities, BIM, GIS, and IoT." International Journal of Open Information Technologies 5.10 (2017): 55-86.
- [14] Kupriyanovsky, Yulia, et al. "Smart container, smart port, BIM, Internet Things and blockchain in the digital system of world trade." International Journal of Open Information Technologies 6.3 (2018): 49-94.
- [15] Кузнецов, В. А., Ю. Г. Руссу, and В. П. Куприяновский. "Об использовании виртуальной и дополненной реальности." International Journal of Open Information Technologies 7.4 (2019).
- [16] Волокитин, Ю. И., et al. "Проблемы цифровой экономики и формализованные онтологии." International Journal of Open Information Technologies 6.6 (2018).
- [17] Klimov, Alexander, et al. "BIM and engineering formalized ontologies on the European digital railway in the EULYNX-data economy." International Journal of Open Information Technologies 6.8 (2018): 38-65.
- [18] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "On the effects of formalized ontologies in the data economy-the EU experience." International Journal of Open Information Technologies 6.8 (2018): 66-78.
- [19] Климов, А. А., et al. "Из истории цифровой энергетики ЕС или энергопотребление близкое к нулю-переход нормативных

- решений ЕС к онтологиям энергетики, BIM и зданий." International Journal of Open Information Technologies 7.6 (2019).
- [20] Ponkin, Igor, et al. "To the question of the content of the concept and of ontology of the Energy Internet and of its legal and technological image." International Journal of Open Information Technologies 7.8 (2019): 87-93.
- [21] Riccardo Levante, Data Management and Virtual Reality Applications of BIM models Masters Thesis in Building Technology Nr 464, KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY SCHOOL OF ARCHITECTURE AND THE BUILT ENVIRONMENT, 2018
- [22] Digital Twins in Logistics <https://ru.scribd.com/document/440655783/glo-core-digital-twins-in-logistics-pdf> 2019 DHL
- [23] ABB review 4 Digital twins and simulations, ABB 2019
- [24] Digital twin TOWARDS A MEANINGFUL FRAMEWORK ARUP 2019
- [25] Feasibility of an immersive digital twin: The definition of a digital twin and discussions around the benefit of immersion. September 2018 A report by the High Value Manufacturing Catapult Visualisation and VR Forum
- [26] Digital twins for the built environment An introduction to the opportunities, benefits, challenges and risks The Institution of Engineering and Technology (IET) 2019 theiet.org/built-environment
- [27] Qiuchen Lu, Xiang Xie, James Heaton, Ajith Kumar Parlikad, and Jennifer Schooling From BIM towards Digital Twin: Strategy and Future Development for Smart Asset Management
- [28] Климов, А. А., et al. "Цифровые технологии, навыки, инженерное образование для транспортной отрасли и технологии образования." International Journal of Open Information Technologies 7.10 (2019).
- [29] Смешанная реальность https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BC%D0%B5%D1%88%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C
- [30] Benefits of Using Augmented Reality in Planning, Construction and Post-Construction Phases in Specialty Contracting by Jad Chalhoub A Dissertation Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy ARIZONA STATE UNIVERSITY May 2019
- [31] The Use of Virtual Reality in Urban Planning Review paper on the (dis)advantages and a new perspective for future research Master thesis - Master of Urbanism and Spatial Planning Academic year 2018-2019 Van Dessel Anke
- [32] AUGMENTED REALITY IN LOGISTICS Changing the way we see logistics – a DHL perspective 2014
- [33] COMMON INFRABIM REQUIREMENTS YIV 2019 GENERAL INITIAL DATA DESIGN CONSTRUCTION Building SMART Finland, Infra infrastructure business group 2.5.2019
- [34] AR/VR revenue <https://artillery.co/artillery-intelligence/forecasts/global-ar-vr-revenue-forecast-2016-2021/>
- [35] Techtarget <https://whatis.techtarget.com>
- [36] AR by 2022 <https://www.digi-capital.com/news/2018/01/ubiquitous-90-billion-ar-to-dominate-focused-15-billion-vr-by-2022/>
- [37] IDC <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS43860118>
- [38] VR in construction <https://connect.bim360.autodesk.com/virtual-reality-in-construction>
- [39] VR to change construction industry <https://vrvisiongroup.com/how-virtual-reality-is-set-to-change-the-construction-industry/>
- [40] Key benefits for AR <https://geniebelt.com/blog/5-key-benefits-from-augmented-reality-in-construction>
- [41] VR BIM Revolution <https://www.building.co.uk/construction-issues/will-virtual-reality-spark-the-bim-revolution-weve-been-waiting-for/5096450.article>
- [42] Dunston, Phillip S., and Xiangyu Wang. "Mixed reality-based visualization interfaces for architecture, engineering, and construction industry." Journal of construction engineering and management 131.12 (2005): 1301-1309.
- [43] AR solutions <https://www.intellectsoft.net/blog/ar-solutions-for-construction/>
- [44] Saimaa University of Applied Sciences Technology, Lappeenranta Degree Programme in Civil and Construction Engineering Anna Iufereva RE-ENGINEERING BIM IN BRIDGE DESIGN Bachelor's Thesis 2019
- [45] Adam Carlsén, Oscar Elfstrand Augmented Construction, Developing a framework for implementing Building Information Modeling through Augmented Reality at construction sites Industrial and Management Engineering, master's level Luleå University of Technology Department of Business Administration, Technology 2018
- [46] Куприяновский В.П., Сиягов С.А., Намиот Д.Е., Шнепп-Шнеппе М.А., Ишмуратов А.Р., Добрынин А.П., Колесников А.Н. ГИГАБИТНОЕ ОБЩЕСТВО И ИННОВАЦИИ В ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКЕ Современные информационные технологии и ИТ-образование 2017 Том 13 № 1 УДК 621.391 С. 103-131.
- [47] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "EU Digital Transport Corridors-5G, Platooning, ITS and MaaS." International Journal of Open Information Technologies 7.8 (2019): 70-86.
- [48] What are digital twins <https://journal.binarydistrict.com/what-are-digital-twins-and-why-are-they-the-next-stage-in-the-internet-of-things-iot/>
- [49] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "On the new IoT generation-ETSI ontology standards and specifications." International Journal of Open Information Technologies 7.9 (2019): 73-81.
- [50] 5G: The Future of IoT © Copyright 2019 5G Americas
- [51] 5G-MoNArch D6.3 Final report on architectural verification and validation, 5G-MoNArch ,2019
- [52] IFC digital twins <https://www.bentley.com/en/about-us/news/2019/october/22/bentley-announces-support-of-ifc-for-digital-twins>
- [53] Finnish BIM Requirements for Infrastructure 2015 Released <https://infrakit.com/en/infrabim-requirements-2015/>
- [54] Nordic Study of Classification Systems for Infrastructure & Transportation Author: Phil Jackson Version S2 Practical Requirements for Classification of Information in Digital Engineering & BIM Nordic Road & Rail BIM Collaboration Building SMART Finland 2019
- [55] Rail Baltica https://ru.wikipedia.org/wiki/Rail_Baltica
- [56] Pokusaev, Oleg, et al. "Europe's digital railway-from ERTMS to artificial intelligence." International Journal of Open Information Technologies 7.7 (2019): 90-119.
- [57] Aecom Rail Baltica <https://tunnels-infrastructures.com/aecom-spain-selected-to-be-part-of-the-rail-baltica-project/>
- [58] Detailed BIM Strategy Update from the BIM Strategy Framework 27/07/2018 Coordinated by RB
- [59] BIM role on Rail Baltica <https://www.theconstructionindex.co.uk/news/view/bentley-wins-bim-role-on-rail-baltica-project>
- [60] Стиль для Rail Baltica <https://www.gudok.ru/1520/newspaper/detail.php?ID=1481369>
- [61] Мост-вокзал <https://archi.ru/world/84868/most-vokzal>

Digital twins based on the development of BIM technologies, related ontologies, 5G, IoT, and mixed reality for use in infrastructure projects and IFRABIM

Vasily Kupriyanovsky, Alexander Klimov, Yuri Voropaev, Oleg Pokusaev, Andrey Dobrynin, Igor Ponkin, Alexander Lysogorsky

Abstract— This article deals with digital twins and their application in BIM technologies. Building Information Modeling (BIM) marks a turning point for industries involved in the life cycle, improving collaboration, efficiency, and productivity. This method represents one of the most important revolutions in the digital economy, focusing on the information aspect of each project and helping to improve well-designed object management systems. Digital Twin is a digital copy of a physical object or process that helps optimize business efficiency. The Digital Twin concept is a part of the fourth industrial revolution and is designed to help businesses detect physical problems faster, predict their results more accurately and produce better products. Fundamentally, the digital twin can be defined as an ever-changing digital profile that contains the historical and most relevant data about a physical object or process, thus optimizing business performance without physically interfering with complex processes. This paper discusses in detail the use of digital twins and mixed reality in infrastructure information modeling systems (infraBIM). In particular, the use of infraBIM in railway design is considered in detail.

Keywords— BIM, Digital twins.

REFERENCES

- [1] Kuprijanovskij V.P., Tishhenko P.A., Raevskij M.A Sredstva ob"ektivnogo kontrolja izmenenij (stroitel'stva) ob"ektov na baze GIS-modelej ArcReview | # 1 (68) za 2014 god
- [2] Bystrova Ju.A., Kuprijanovskij V.P., Tishhenko P.A., Sinjagov S.A., Raevskij M.A., Lipatov S.I, Savel'ev S.I. Komponentnyj BIM/GIS-podhod k informacionnomu modelirovaniju sooruzhenij .ArcReview | # 2 (73) za 2015 god.
- [3] Kuprijanovskij V.P., Tishhenko P.A., Sinjagov S.A. Primenenie kombinirovannyh tehnologij BIM-GIS v stroitel'noj otrasli dlja razlichnyh kategorij zainteresovannyh lic: Obzor sostojanija v mire# 2 (73) za 2015 god.
- [4] Dobrynin, A.P., et al. "The Digital Economy-the various ways to the effective use of technology (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA, and others)." International Journal of Open Information Technologies 4.1 (2016): 4-11.
- [5] Kuprijanovskij V.P., Sinjagov S. A., Dobrynin A.P. Cifrovaja jekonomika. Kak dostigli uspeha?Prakticheskij podhod k teoreticheskoy koncepcii. Chast' 1. Podhody i osnovnye preimushhestva //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 3.
- [6] Kuprijanovskij V. P., Sinjagov S. A., Dobrynin A. P. BIM-Cifrovaja jekonomika. Kak dostigli uspeha? Prakticheskij podhod k teoreticheskoy koncepcii. Chast' 2. Cifrovaja jekonomika //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 3.
- [7] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "The economic benefits of the combined use of BIM-GIS models in the construction industry. Review of the state of the world." International Journal of Open Information Technologies 4.5 (2016): 14-25.
- [8] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "The new five-year plan for BIM-infrastructure and Smart Cities." International Journal of Open Information Technologies 4.8 (2016): 20-35.
- [9] Zamolodchikov D. et al. Comfortable environment and resources for passenger stations in the lifecycle of digital railways assets //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 3. – S. 100-116.
- [10] Sinyagov, Sergey, et al. "Building and Engineering Based on BIM Standards as the Basis for Transforming Infrastructures in the Digital Economy." International Journal of Open Information Technologies 5.5 (2017): 46-79.
- [11] Sokolov, Igor, et al. "Smart cities, infrastructure, and their anti-terrorist stability. The experience of integrating the US anti-terrorism standards and creating software for digital security." International Journal of Open Information Technologies 5.7 (2017): 45-65.
- [12] Kuprijanovskij V.P., Alen'kov V.V., Klimov A.A., Sokolov I.A., Zazhigalkin A.V. CIFROVAJA ZHELEZNAJA DOROGA – ERTMS, BIM, GIS, PLM I CIFROVYE DVOJNIKI. Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie 2017 Tom 13 # 3. S. 129- 166.
- [13] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "Smart infrastructure, physical and information assets, Smart Cities, BIM, GIS, and IoT." International Journal of Open Information Technologies 5.10 (2017): 55-86.
- [14] Kupriyanovsky, Yulia, et al. "Smart container, smart port, BIM, Internet Things and blockchain in the digital system of world trade." International Journal of Open Information Technologies 6.3 (2018): 49-94.
- [15] Kuznecov, V. A., Ju. G. Russu, and V. P. Kuprijanovskij. "Ob ispol'zovanii virtual'noj i dopolnennoj real'nosti." International Journal of Open Information Technologies 7.4 (2019).
- [16] Volokitin, Ju. I., et al. "Problemy cifrovoj jekonomiki i formalizovannye ontologii." International Journal of Open Information Technologies 6.6 (2018).
- [17] Klimov, Alexander, et al. "BIM and engineering formalized ontologies on the European digital railway in the EULYNX-data economy." International Journal of Open Information Technologies 6.8 (2018): 38-65.
- [18] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "On the effects of formalized ontologies in the data economy-the EU experience." International Journal of Open Information Technologies 6.8 (2018): 66-78.
- [19] Klimov, A. A., et al. "Iz istorii cifrovoj jenergetiki ES ili jenergotreblenie blizkoe k nulju-perehod normativnyh reshenij

- ES k ontologijam jenergetiki, BIM i zdanih." International Journal of Open Information Technologies 7.6 (2019).
- [20] Ponkin, Igor, et al. "To the question of the content of the concept and of ontology of the Energy Internet and of its legal and technological image." International Journal of Open Information Technologies 7.8 (2019): 87-93.
- [21] Riccardo Levante, Data Management and Virtual Reality Applications of BIM models. Masters Thesis in Building Technology Nr 464, KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY SCHOOL OF ARCHITECTURE AND THE BUILT ENVIRONMENT, 2018
- [22] Digital Twins in Logistics <https://ru.scribd.com/document/440655783/glo-core-digital-twins-in-logistics-pdf> 2019 DHL
- [23] ABB review 4 Digital twins and simulations, ABB 2019
- [24] Digital twin TOWARDS A MEANINGFUL FRAMEWORK ARUP 2019
- [25] Feasibility of an immersive digital twin: The definition of a digital twin and discussions around the benefit of immersion. September 2018 A report by the High Value Manufacturing Catapult Visualisation and VR Forum
- [26] Digital twins for the built environment An introduction to the opportunities, benefits, challenges and risks The Institution of Engineering and Technology (IET) 2019 theiet.org/built-environment
- [27] Qiuchen Lu, Xiang Xie, James Heaton, Ajith Kumar Parlikad, and Jennifer Schooling From BIM towards Digital Twin: Strategy and Future Development for Smart Asset Management
- [28] Klimov, A. A., et al. "Cifrovyte tehnologii, navyki, inzhenernoe obrazovanie dlja transportnoj otrasli i tehnologii obrazovanija." International Journal of Open Information Technologies 7.10 (2019).
- [29] Smeshannaja real'nost' https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BC%D0%B5%D1%88%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C
- [30] Benefits of Using Augmented Reality in Planning, Construction and Post-Construction Phases in Specialty Contracting by Jad Chalhoub A Dissertation Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy ARIZONA STATE UNIVERSITY May 2019
- [31] The Use of Virtual Reality in Urban Planning Review paper on the (dis)advantages and a new perspective for future research Master thesis - Master of Urbanism and Spatial Planning Academic year 2018-2019 Van Dessel Anke
- [32] AUGMENTED REALITY IN LOGISTICS Changing the way we see logistics – a DHL perspective 2014
- [33] COMMON INFRABIM REQUIREMENTS YIV 2019 GENERAL INITIAL DATA DESIGN CONSTRUCTION Building SMART Finland, Infra infrastructure business group 2.5.2019
- [34] AR/VR revenue <https://artillery.co/artillery-intelligence/forecasts/global-ar-vr-revenue-forecast-2016-2021/>
- [35] Techtargget <https://whatis.techtarget.com>
- [36] AR by 2022 <https://www.digitalscapital.com/news/2018/01/ubiquitous-90-billion-ar-to-dominate-focused-15-billion-vr-by-2022/>
- [37] IDC <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS43860118>
- [38] VR in construction <https://connect.bim360.autodesk.com/virtual-reality-in-construction>
- [39] VR to change construction industry <https://vrvisiongroup.com/how-virtual-reality-is-set-to-change-the-construction-industry/>
- [40] Key benefits for AR <https://geniebelt.com/blog/5-key-benefits-from-augmented-reality-in-construction>
- [41] VR BIM Revolution <https://www.building.co.uk/construction-issues/will-virtual-reality-spark-the-bim-revolution-weve-been-waiting-for/5096450.article>
- [42] Dunston, Phillip S., and Xiangyu Wang. "Mixed reality-based visualization interfaces for architecture, engineering, and construction industry." Journal of construction engineering and management 131.12 (2005): 1301-1309.
- [43] AR solutions <https://www.intellectsoft.net/blog/ar-solutions-for-construction/>
- [44] Saimaa University of Applied Sciences Technology, Lappeenranta Degree Programme in Civil and Construction Engineering Anna Iufereva RE-ENGINEERING BIM IN BRIDGE DESIGN Bachelor's Thesis 2019
- [45] Adam Carlsén, Oscar Elfstrand Augmented Construction, Developing a framework for implementing Building Information Modeling through Augmented Reality at construction sites Industrial and Management Engineering, master's level Luleå University of Technology Department of Business Administration, Technology 2018
- [46] Kuprijanovskij V.P., Sinjagov S.A., Namiot D.E., Shnepshneppe M.A., Ishmuratov A.R., Dobrynin A.P., Kolesnikov A.N. GIGABITNOE OBSHHESTVO I INNOVACII V CIFROVOJ JeKONOMIKE Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie 2017 Tom 13 # 1 UDK 621.391 S. 103-131.
- [47] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "EU Digital Transport Corridors-5G, Platooning, ITS and MaaS." International Journal of Open Information Technologies 7.8 (2019): 70-86.
- [48] What are digital twins <https://journal.binarydistrict.com/what-are-digital-twins-and-why-are-they-the-next-stage-in-the-internet-of-things-iiot/>
- [49] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "On the new IoT generation-ETSI ontology standards and specifications." International Journal of Open Information Technologies 7.9 (2019): 73-81.
- [50] 5G: The Future of IoT © Copyright 2019 5G Americas
- [51] 5G-MoNArch D6.3 Final report on architectural verification and validation. 5G-MoNArch, 2019
- [52] IFC digital twins <https://www.bentley.com/en/about-us/news/2019/october/22/bentley-announces-support-of-ifc-for-digital-twins>
- [53] Finnish BIM Requirements for Infrastructure 2015 Released <https://infrakit.com/en/infrabim-requirements-2015/>
- [54] Nordic Study of Classification Systems for Infrastructure & Transportation Author: Phil Jackson Version S2 Practical Requirements for Classification of Information in Digital Engineering & BIM Nordic Road & Rail BIM Collaboration Building SMART Finland 2019
- [55] Rail Baltica https://ru.wikipedia.org/wiki/Rail_Baltica
- [56] Pokusaev, Oleg, et al. "Europe's digital railway-from ERTMS to artificial intelligence." International Journal of Open Information Technologies 7.7 (2019): 90-119.
- [57] Aecom Rail Baltica <https://tunnels-infrastructures.com/aecom-spain-selected-to-be-part-of-the-rail-baltica-project/>
- [58] Detailed BIM Strategy Update from the BIM Strategy Framework 27/07/2018 Coordinated by RB
- [59] BIM role on Rail Baltica <https://www.theconstructionindex.co.uk/news/view/bentley-wins-bim-role-on-rail-baltica-project>
- [60] Stil' dlja Rail Baltica <https://www.gudok.ru/1520/newspaper/detail.php?ID=1481369>
- [61] Most-vokzal <https://archi.ru/world/84868/most-vokzal>.