

# Технологии BIM для туннелей, используемых в метрополитенах, на железнодорожных и автомобильных дорогах и на Hyperloop - системы реального времени на базе IFC и подрывные инновации

В.П. Куприяновский, Ю.Н. Воропаев, О.Н. Покусаев, А.А. Климов, А.П. Добрынин, Д.А. Гапанович

**Аннотация**—В статье речь идет об использовании технологий BIM для туннелей. Строительство туннелей и метрополитенов представляет собой одну из самых сложных областей применения специального оборудования в гражданском строительстве. Строительная площадка под землей требует использования машин, которые могут работать в очень специфических условиях. Это узкое и ограниченное пространство, большие объемы материала на строительной площадке, пыль и другие факторы, затрудняющие работу. Уровни безопасности в таком строительстве также должны быть очень высокими. Цена ошибок и несоответствий в туннельном бизнесе также крайне высока, как и цена успеха, который делает возможным то, что ранее считалось невозможным. Применение BIM как центра сбора и использования инноваций, снижающих стоимость и сроки строительства, а также улучшающего условия труда, в туннелях и метро, фактически, началось одновременно с возникновением современного BIM. Поэтому, исходя из растущих потребностях в знаниях, выраженных в формализованных семантиках и онтологиях признанных в цифровой экономике, в сложных проектах строительства необходима система управления знаниями, ставящая в основу онтологическую модель BIM, размещенную в центре обработки данных реального времени.

**Ключевые слова**— BIM, железные дороги, инновации.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Строительство туннелей и метрополитенов - одна из самых сложных областей применения строительного

Статья получена 22 июля 2020

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

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

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

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

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

Гапанович Д. А. - независимый исследователь (email: dim.gapanovich@gmail.com).

оборудования в гражданском строительстве. Строительная площадка под землей требует использования машин, которые могут работать в очень специфических условиях: узкое и ограниченное пространство, большие объемы материала на строительной площадке и пыль - факторы, затрудняющие работу. Уровни безопасности в таком строительстве также должны быть очень высокими. Цена ошибок и несоответствий в туннельном бизнесе также крайне высока, как и цена успеха, который делает возможным то, что ранее считалось невозможным. Но и иного разумного выхода кроме оптимального использования подземного пространства в сегодняшних условиях также нет [8]. Применение BIM как центра сбора и использования инноваций, снижающих стоимость и сроки строительства, а также улучшающего условия труда [5-8, 33], в туннелях и метро фактически началось одновременно с возникновением современного BIM в Великобритании на проекте Crossrail [5]. Crossrail в завершённом виде - это линия метрополитена нового поколения в Лондоне, пересекающая весь город, имеющая удобные соединения со старым метро и линиями железных дорог, но путь до стандартизации применения в зданиях эта технология проделала быстрее, чем до инфраструктур. Мировая стандартизация BIM для инфраструктур началась только сейчас, что свидетельствует уже о достаточном опыте применения [9].

Строительный сектор имеет стратегическое значение, поскольку он предоставляет здания и инфраструктуру, необходимые остальной экономике и обществу России. На его долю приходится, например, 9% валового внутреннего продукта ЕС (ВВП) и более 50% накопления основного капитала. Это крупнейшая экономическая деятельность и крупнейший промышленный работодатель в Европе [1]. Думаем, что и в России это примерно так же.

В частности, туннельные проекты в Европе формируют большую часть рынка инфраструктуры, и существует постоянный спрос на туннели. Автомобильные и железнодорожные туннели, а также метрополитены, играют центральную роль в современной экономике, через которую ежедневно проходят тысячи людей и

тонны товаров. Отказ таких критических звеньев может привести к значительному разрушению большей части европейской транспортной системы [1].

Несмотря на уникальные характеристики конструкции туннеля, в настоящее время не существует каких-либо европейских стандартов проектирования туннелей или согласованных руководящих принципов на европейском уровне [1] и это предмет серьезных дискуссий в ЕС. В России также уже начато обсуждение темы стандартизации BIM для транспортного сектора и использования международно признанных норм и правил и в частности туннелей и подземных сооружений [3-12].

BIM был задуман для решения сложных проблем, поскольку он пересекает как производственный, так и технологический мир, в которых сегодня проходят известные инновационные и подрывные изменения [10,12]. Его потенциал раскрывается двойным инструментальным и процессуальным характером, который не может действовать независимо, не поддержанный нормами, которые определяют законы, стандарты и правила. Важно отметить, что BIM - это не просто технология, а методологическая работа, основанная на обмене информацией на протяжении всего жизненного цикла здания и сооружения, и не просто набор инструментов для дизайнеров. Конечно, в случае новых сооружений и зданий, рекомендуется использовать рабочий процесс BIM с начального этапа проектирования для того чтобы получить большую пользу при строительстве. Однако известно, что 80% проблем при его внедрении носят не технологический характер, да и сама сеть сопутствующих категорий научных дисциплин BIM по анализу работ в Web of Science (рисунок 2) очень разнообразна (размер наименования дисциплины отражает частоту ее использования в работах по BIM).

Поэтому, исходя из растущих потребностях в знаниях, выраженных в формализованных семантиках и онтологиях признанных в цифровой экономике [9], в сложных проектах строительства необходима система управления знаниями, ставящая в основу онтологическую модель BIM, размещенную в центре обработки данных реального времени. Информационное моделирование зданий представляет собой наиболее подходящий подход для этих целей, которые должны вести к оптимальному хранению данных и обеспечению их доступности в течение жизненного цикла здания или сооружения, продвижение интеллектуального процесса цифровизации в части применения различных и не обязательно цифровых инновационных технологий. Три взаимосвязанных онтологических домена поля деятельности BIM приводятся на рисунке 3 для пояснения сказанного, взятые из современных научных исследований по теме BIM, количество которых в мире сегодня приближается к 1 млн.

Мы считаем, что строительство само по себе развивается как инновационный процесс создания новых объектов и сооружений, подразумевает привлечение, в том числе подрывных технологий в их жизненный цикл [21]. Причина инновационности строительства - это желания и возможности заказчиков получить здания и сооружения нового качества, по

сравнению с уже имеющимися, и обеспечить их выгодное использование на рынке. Систему управления знаниями на основе BIM, инновациями и подрывными технологиями мы приводим на рисунке 1. Следует сказать, что схема на рисунке 1 связана не только с новыми строительными продуктами, но и глубоким изменением сути старых. Например, внешне не измененные кирпич и черепица могут быть источниками получения солнечной энергии, как и окна, и вы можете себе представить весь дом как энергетическую установку. Подземное пространство также сегодня рассматривается как практический источник тепловой энергии за счет применения тепловых насосов и иных решений. В крайне интересном проекте REUSEHEAT - восстановление городского избыточного тепла (<https://cordis.europa.eu/project/rcn/212354/factsheet/en>, <https://www.reuseheat.eu/>) эта инновационная тематика рассматривается на уровне всего подземного пространства города, включая канализацию, туннели и метрополитены. И, хотя мы и далее будем приводить различные примеры инноваций в создании туннелей и подземных сооружений и их включении в легальные модели BIM, укажем еще один проект ЕС COMPOSKE. Он посвящен разработке новой технологии производства каркасов из композиционных материалов для реализации сборных туннельных сегментов (<https://cordis.europa.eu/project/id/672267>, <http://www.atp-frp.com/html/composke.html>), то есть самому массовому строительному элементу в создании туннелей.

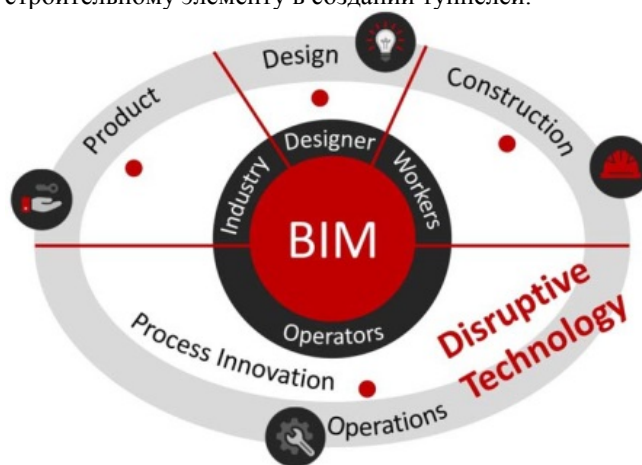


Рис. 1. Система управления знаниями на основе BIM, инновациями и подрывными технологиями [2].

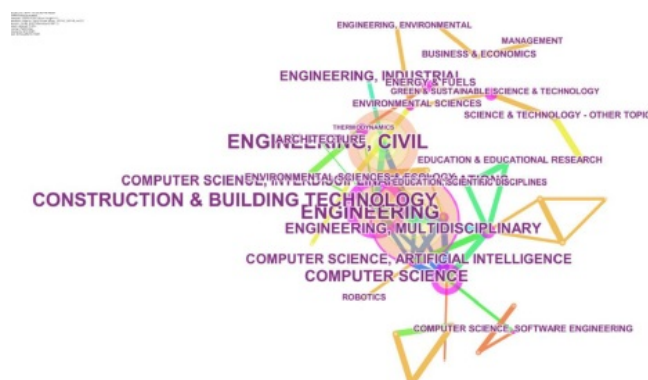


Рис. 2. Сеть сопутствующих категорий научных дисциплин BIM Web of Science [13].

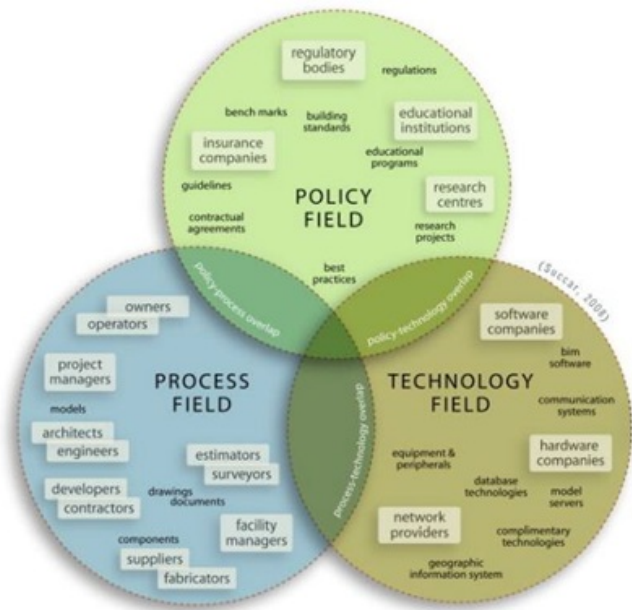


Рис. 3. Три взаимосвязанных онтологических домена поля деятельности BIM [13].

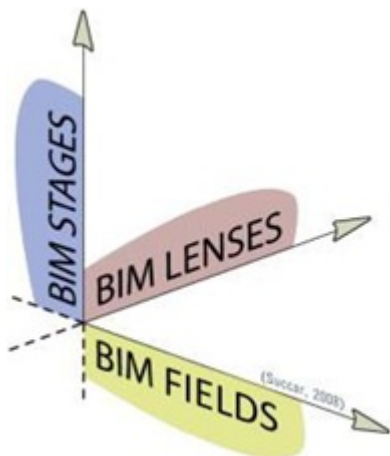


Рис. 4. Структура BIM: трехосная модель полей, ступеней и линз [13].

В исследования [13] выясняется, что цифровая трансформация может с помощью BIM решить проблемы сотрудничества, обнаруживаемые в традиционных подходах. Цифровая трансформация предполагает использование цифровых технологий для преобразования, но и сам BIM развивается как модель в направлении полей, ступеней и линз (рисунок 4). Развитие его сущностей состоит в том, чтобы использовать технологию не только для копирования существующей услуги в цифровой форме, но и использовать технологию для преобразования этой услуги во что-то значительно лучшее [13] и составляет сущность подрывных технологий.

Сферы деятельности BIM включают (рисунок 3): Технологии, процессы и политики. В этой работе мы используем «продукты» вместо технологии, поскольку это влечет за собой более широкое понятие, которое также включает в себя технологию и «людей» вместо только «процессов» и вместо только политики. Подробное и актуальное описание этих полей, которые

будут измерениями нашей экосистемы BIM для туннелей и метрополитенов, позволит нам описать основные концепции для внедрения BIM в архитектурные практики подземных систем. Успешное внедрение BIM / VDC в проекты дает большие преимущества и это то, с чем работают многие компании отрасли, и то направление, куда они стремятся развиваться. Целью этой работы не является исследование того, как работают члены команды проекта, хоть это и невероятно важно. Мы изучаем легальность построения моделей BIM, в том числе, чтобы дать возможность понять заинтересованным лицам как они воспринимают методы совместной работы в подземных строительных проектах, чтобы они сделали шаг вперед в цифровизации этого строительства, построив и восприняв юридически обязательную цифровую модель вместо традиционных бумажных чертежей [34].

Однако прежде чем переходить к тематике BIM, инноваций, юридически обязательных цифровых моделей и подрывных технологий для туннелей и метрополитенов мы посчитали правильным представить читателю картину развития цифровых стандартов и правил подземного пространства, так как никакая инновация не может в этом сложном и опасном мире без учета норм и правил быть успешно реализована.

## II. ЦИФРОВОЙ ОБРАЗ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА И ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ BIM

Одна из самых продвинутых сегодня стран в части работы по цифровизации подземного пространства - это Великобритания. Важно так же, что британцы имеют одну из самых интересных и развитых систем стандартизации по работе с цифровыми образами подземного пространства, как в Европе, так и в мире. Необходимость объективного понимания перехода от бумажных носителей к цифровым представлениям состояния подземного пространства созрела к практической реализации практически одновременно в США и Великобритании и несколько позже в Европе и Австралии. Ранее в Великобритании существовали (они до сих пор частично применяются) сотни стандартов и норм отражавшие специфику работы под землей (многие из них есть на сайте - <https://geotechnicaldesign.info/>), но многие из них не имеют возможности применения для цифровых технологий. Мы отобрали из этого множества стандартов Bsi только те, которые имеют префикс PAS (публично доступная спецификация), то следует отдельно пояснить, что такое стандарты PAS.

Процесс PAS, говоря формально, это спонсируемая ускоренная спецификация, разработанная Британским институтом стандартов (BSI). Процесс PAS требует от 12 до 16 месяцев от начала до публикации и следует строгим правилам, установленным BSI. В качестве спонсоров выступают разные, в том числе и правительственные, структуры, определяющие срочный общественный или бизнес интерес в той или иной стандартизации. Как правило, этот процесс позволяет закрепить в национальной стандартизации наиболее актуальные темы. В результате сегодня именно черз

механизмы PAS были выпущены знаменитые стандарты на BIM, ставшие прообразом международной стандартизации BIM, и многие другие широко известные в мире системы стандартизации. По сути появление PAS Bsi является признаком стандартизации, либо подрывных инноваций, либо насущных нужд развития цифровой экономики

Один из наиболее удачных стандартов по цифровому подземному пространству PAS 128 [14] был выпущен Bsi (Британским институтом стандартизации) как ответ на насущную необходимость легализации применения новых инновационных технологий цифрового сканирования подземных объектов.

Британский стандарт PAS 128, который определяет уровни качества для размещения подземных коммуникаций, был выпущен в 2014 году. В настоящее время он находится на пересмотре. Создание PAS 128 было полностью работой добровольцев, но использование логотипа мирового бренда BSI требует поддержки. Исторически сложилось так, что разработка стандарта PAS 128 для определения местоположения подземных коммуникаций спонсировалась многими организациями в Великобритании, включая Институт инженеров-строителей (ICE), Heathrow Airport Holdings, Highways Agency, Transport for London, National Joint Utilities Group, Ordnance Survey, университетом Бирмингема, Ассоциацией картографии коммунальных предприятий и другими [18].

PAS 128 был предназначен, при своем создании, для специалистов-практиков, а не для клиентов, был введен в действие в 2012 году и прошел три пилотных проекта. В отрасли подземных коммуникаций Великобритании был высокий уровень участия в использовании этого стандарта. Первый вариант получил 508 комментариев, второй - 685. Окончательный вариант был опубликован в 2014 году и описывает иерархию уровней качества, аналогичную стандарту Американского общества инженеров-строителей (ASCE)[18]. Он позволяет организовать:

- 1 Поиск записей утилит для настольных ПК - сбор и просмотр фактических данных от коммунальных и телекоммуникационных компаний.
2. Рекогносцировку площадки - посещение площадки и определение соответствующих элементов поверхности.
3. Обнаружение - использование георадара и электромагнитного обнаружения и, возможно, других технологий дистанционного зондирования. Он также включал абсолютную точность от B1 до B3.
4. Проверку - использование безопасных землеройных инструментов на месте, чтобы выкопать и найти инженерные сети.

Стандарт PAS 128 оказался очень успешным. Было продано более 400 экземпляров, что является исключением для публикаций BSI, которые обычно продаются в количестве порядка 200 экземпляров. Его приняли Гонконг, Сальвадор и страны Ближнего Востока. Но он нуждается в обновлении, чтобы использовать преимущества новых инновационных возможностей исследований подземного пространства, таких как британские проекты «Составление карты подземного мира» и «Оценка подземного мира», а также

новые методы обнаружения и исследования, такие как гироскопическое картографирование [18].

Также необходимо решить некоторые серьезные проблемы, как считают в Великобритании [18]. Этот документ должен содержать рекомендации для клиентов, но действующий стандарт адресован практикам. Текущий стандарт предполагает 2D-мир. В обновленной версии необходимо уделять больше внимания 3D и BIM [18]. Один из основных вопросов, включать ли постобработку георадарных сканирований, требует повторного рассмотрения. Между выпущенными PAS 256 и PAS 128 есть несоответствия [18].

Чтобы поддержать пересмотр, который снова будет выполняться волонтерами, сегодня ищут спонсоров для финансирования использования ресурсов BSI и людей, которые присоединятся к группе обсуждения [18].

Следующий стандарт – PAS 256 [14] известен под неформальным названием как стандарт о захороненных активах, и это новый свод правил регистрации данных о подземных коммуникациях. Новый свод правил, призван изменить способы сбора, записи, обслуживания и обмена данными о подземных коммуникациях, таких как водопроводные трубы, телефонные линии и оптоволоконные кабели, ставя во главу угла их цифровые представления [19].

Точное картирование подземных коммуникаций - также известных как «захороненные активы» - жизненно важно для тех, кто проводит раскопки, чтобы поддерживать обслуживание, минимизировать затраты, а также соблюдать законодательство в области здравоохранения и безопасности. Ежегодно в Великобритании проводится более 3 миллионов земляных работ на автомагистралях, однако отраслевые рекомендации для владельцев активов о том, как лучше всего управлять этими записями и поддерживать их, отсутствовали на дату выпуска этого стандарта. Это приводило к ненужным раскопкам, вызывая ненужное нарушение окружающей среды и неудобства для населения.

В свою очередь PAS 256, про скрытые активы, позволяет организовать это сбор, запись, поддержание и совместное использование информации и данных о местоположении и составляет свод правил. Он, был создан для решения проблемы различного качества, надежности и доступности существующих данных. Этот PAS, спонсируемый Институтом инженеров-строителей, предоставляет рекомендации и руководство по совершенствованию сбора, регистрации и хранения данных, связанных с захороненными активами, а также безопасного обмена информацией об активах, касающейся коммунальных предприятий, местных властей и других поставщиков инфраструктуры.

Обширная сеть скрытых активов в Великобритании, обычно принадлежащих коммунальным компаниям и местным властям, составляет ключевую часть критически важной национальной инфраструктуры Великобритании. Этот PAS применяется к захороненным активам, расположенным на частных и государственных землях, а свод правил распространяется на [19]:

- перенос пространственных данных с использованием как минимум относительной точности и движением к

абсолютной точности (включая глубину) вместе с подтверждающими доказательствами, такими как фотографии или маркировка

- включение списанных или заброшенных активов при обмене данными
- использование предупредительных и защитных устройств для определения окончательного местоположения захороненного актива
- целевое количество дней, в течение которых данные будут доступны для обмена после установки
- сбор данных, полученных в результате работ, выполняемых по лицензии S50 или аналогичной
- совместимость с языком географической разметки (GML)
- включение захороненных активов местных властей и других организаций
- переход от бумажных записей или микрофишей к структурированному доступному цифровому формату
- символы, типология, цветового кодирования и наложения
- глоссарий данных

PAS 256 предназначен для использования вместе со спецификациями PAS 128 для обнаружения, проверки и определения местонахождения подземных коммуникаций. PAS 128 применяется к активным, заброшенным, избыточным или неизвестным подземным коммуникациям и расположению связанных с ними поверхностных объектов. Он определяет требования к обнаружению, проверке и расположению существующих и новых подземных коммуникаций.

Помимо Института инженеров-строителей, в разработке PAS 256 принимали участие множество организаций Великобритании.

Практика применения этих двух инновационных стандартов цифровой экономики привела к тому что организован отдельный национальный проект Iceberg. Его участниками стали British Geological Survey, Ordnance Survey и Future Cities Catapult которые работают над проектом в 2016-17 годах, чтобы дать планировщикам, коммунальным компаниям и разработчикам лучшее представление о том, что находится под землей, путем построения более полной картины наших городов с помощью цифровых данных. Долгосрочная цель проекта Iceberg состояла в том, чтобы помочь повысить жизнеспособность земли для разработки и снизить риски будущих инвестиций за счет более эффективного использования информации о недрах [20].

Чтобы реализовать весь потенциал данных о недрах, Iceberg исследовал способы объединения данных и услуг, предоставляемых рядом организаций, и интеграции их с другими данными о городах. Сегодня в России также, например, существует много данных о недрах, и есть различные стандарты, определяющие, как информация должна собираться, но информация рассредоточена среди множества различных сторон и очень часто не является соответствующей требованиям цифровой экономики. Это отсутствие нужных форматов координации и сотрудничества имеет свои издержки. Например, прямые затраты, связанные с «нормальным» обслуживанием подземных объектов электроснабжения,

газа и воды, исчислялись как показал Iceberg [20] миллиардами фунтов в год без учета косвенных затрат, таких как увеличение дорожных заторов во время земляных работ.

Проект «Iceberg» обнаружил необходимость в общедоступной структуре обмена цифровыми данными о недрах, которую можно было бы интегрировать с существующими городскими системами данных. Это не единая карта недр, а единообразная структура, в которой данные предоставляются, гарантируются, хранятся, доступны и анализируются множеством пользователей в краткосрочной перспективе, при этом должным образом обеспечивается конфиденциальность и безопасность

Отсутствие стандартов, регулирующих сбор скрытых данных, означает, что лица, принимающие решения, работающие над межсекторальными проектами, такими как туннели и метрополитены, сталкиваются с проблемой распутывания сети доступных данных. Незнание того, что закопано и где захоронено, приводит к значительным нарушениям, потере времени, задержкам в уличных работах, возможному повреждению других коммуникаций и ненужным дополнительным расходам на ремонт и компенсацию [20].

Этот недостаток легальных знаний также представляет собой реальную угрозу здоровью и безопасности для работников коммунальных предприятий и населения отмечается в документах проекта Iceberg . В интересах России и любой иной страны решить эту проблему путем получения подробной и точной легальной картины подземного пространства и объединения ее с легальной моделью наземных данных для совместной операционной и инновационной деятельности.

Итог исследований проекта Iceberg и понимание будущего планирования подземного пространства (пока без туннелей и метрополитенов) приведен на рисунке 5.



Рис. 5. Понимание будущего планирования подземного пространства в проекте Iceberg и зона действия исследований проекта Iceberg [20].

Следующим шагом цифровизации подземного пространства в Великобритании было учреждение в 2018 году Геопространственной комиссии правительства страны как независимого экспертного комитета, который отвечает за настройку в Великобритании геопространственной стратегии и координацию геопространственной деятельности государственного сектора. Его цель разблокировать значительные экономические, социальные и экологические возможности, предлагаемые данными о

местоположении и для увеличения глобального геопроостранственного опыта их использования в Великобритании [21]. В апреле 2019 года Геопроостранственная комиссия объявила о 12 месячном пилотировании «Национального Регистра подземных активов» («National Underground Assets Register» (NUAR)), а в июне 2020 официально представила результаты [21]. Цифровой образ подземного пространства Великобритании приведен на рисунке 6 и он уже включает разного рода туннели и метрополитен. Чуть позже была принята национальная стратегия геопроостранственных данных [24] на 2020 – 2025 годы содержащая специальный раздел по подземной цифровой информации.

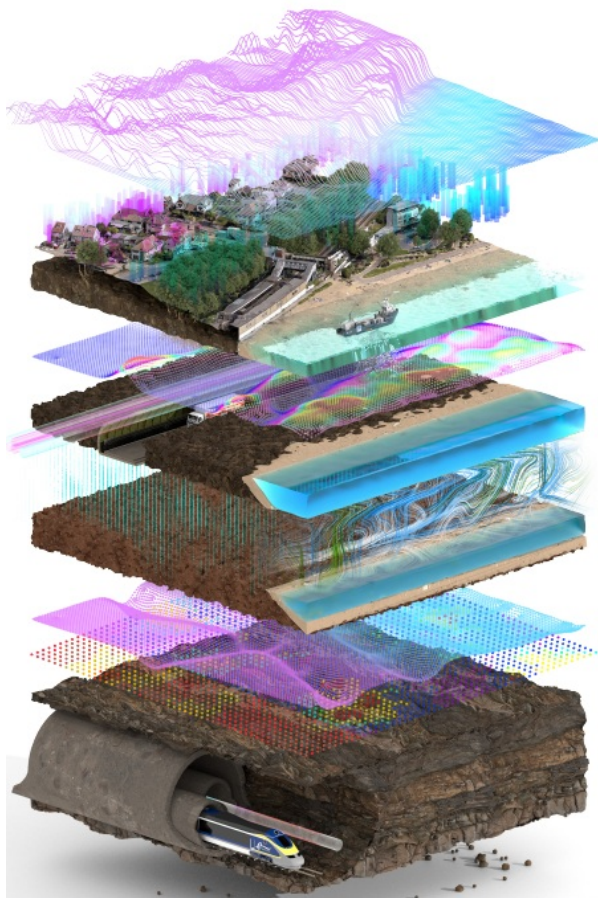


Рис. 6. Цифровой образ подземного пространства Великобритании [21]

Подрывные технологии начинают комбинироваться друг с другом, существенно увеличивая предполагаемые выгоды. В построении цифровых образов подземного пространства. Приведем в качестве примера проект ЕС – BADGER.

BADGER (Робот для автономных бестраншейных операций под землей, картографии и навигации <https://cordis.europa.eu/project/rcn/206880/factsheet/en>, <https://www.badger-robotics.eu/>) - это трехлетний исследовательский проект, финансируемый Европейской комиссией в рамках программы HORIZON2020, в какой-то мере аналогичен роботам – ТВМ, о которых мы будем говорить далее. Целью BADGER является проектирование и разработка интегрированной системы для подземного робота для

самостоятельного строительства подземных малых диаметров и высотно изогнутых туннельных сетей в городских условиях. Для этого продвинутая робототехника будет использовать методы управления, такие как локализация, картирование и автономная навигация; сенсорный синтез, включая подземную одометрию и георадары; адаптационное поведение для разных почв; машинное обучение; и т.п.

Роботизированная система позволит выполнять задачи в разных областях приложений высокого социального и экономического влияния, включая бестраншейные сооружения (прокладка кабелей и трубопроводов), поисково-спасательные работы, дистанционные исследования и разведочные приложения [55].

Буровые системы с длиной бурения от 200 м до 400 м идеально подходят для строительства сетей аппаратами, как считают в проекте [55]. Небольшие буровые системы могут охватывать весь репертуар домашних подключений длиной до 60 м. Бурение в городах с помощью устройств BADGER показано на рисунке 7.



Рис. 7. Бурение в городах (вид сбоку) [55].

Наличие цифровых карт подземного пространства может существенно улучшить работы BADGER, как и сам проект может помочь в построении цифровых образов подземного пространства. BADGER позволяет наносить на карту подземный мир, осуществляющий георадар в скважине и технологию наземных радаров. Таким образом, можно составить точную карту подземного мира, включая установленные трубы, кабели, канализационные линии и препятствия. Как это представляют в проекте показано на рисунке 8.

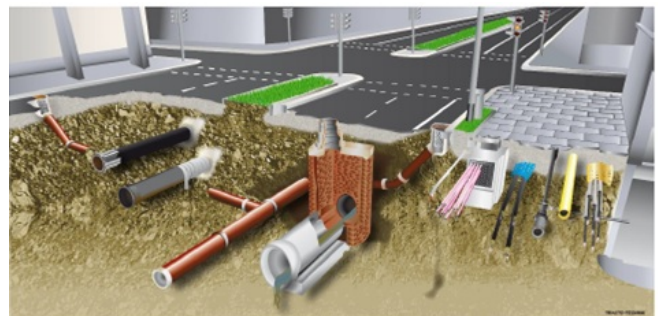


Рис. 8. Кабели, трубы и сигнальные линии в метро [55]

В США, откуда многие начинания переходят в Великобританию из-за близости языка и культуры, где они творчески преобразуются, и, зачастую, в это виде

распространяются по всему миру (так было, например, с BIM), огромное значение в практическом смысле имеет цифровизация состояния подземного пространства. Видимо одна из самых больших инфраструктур в мире это автодороги и то, что у них находится как над землей, так и под землей. Это утверждение особенно верно для такой тотально автомобильной страны как Америка.

Федеральное управление шоссейных дорог США проводило исследование с 2012 по 2015 год, чтобы задокументировать вопросы, связанные с утверждением государственных транспортных ведомств об их ответственности за управление инженерными сооружениями в пределах полосы отчуждения шоссе [22]. Исследование было сосредоточено на использовании трехмерных (3D) технологий государственными транспортными ведомствами. В исследовании рассматривались следующие темы: (1) возможность использования государственных транспортных ведомств в качестве центрального хранилища коммунальных данных в пределах полосы отвода государственных автомагистралей; (2) преимущества наличия надежных и точных данных о коммунальных услугах во время реализации проекта; (3) препятствия для сбора и управления данными о местонахождении коммунальных предприятий, а также стратегии преодоления этих препятствий; и (4) затраты на управление трехмерными данными о местонахождении коммунальных предприятий и маркировку коммунальных предприятий с помощью технологии радиочастотной идентификации (RFID) [22]. В результате анализа был сделан вывод о том, что разработка и поддержание надежной инвентаризации коммунальных объектов в пределах полосы отвода государственной автомагистрали осуществимо и дает значительные преимущества. В исследовании были определены 10 реализуемых стратегий для достижения этой цели, а также 6 стратегий, требующих доработки. Окупаемость инвестиций (ROI) для подготовки трехмерной инвентаризации коммунальных предприятий может быть того же порядка величины, что и ROI для обычных исследований коммунальных предприятий [22].

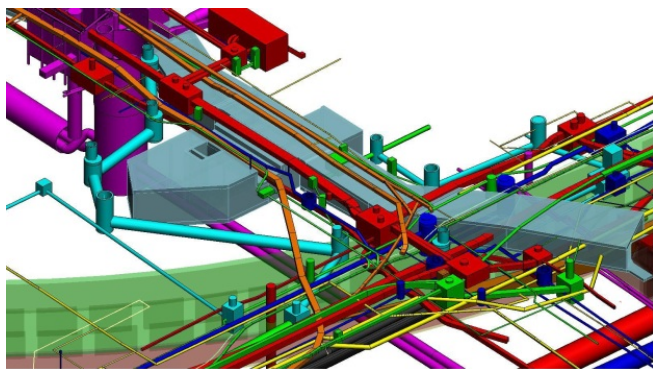


Рис. 9. 3D-модель Северо-западного пешеходного туннеля PATH, Торонто, Канада [22].

Эта работа [22] приводит массу полезных сведений и богато иллюстрирована, но мы приводим из нее только рисунок 9, который показывает, что даже относительно, как кажется, простой пешеходный туннель, который, как

правило, не является объектом глубокого залегания под землей, имеет весьма развитую инженерную инфраструктуру именно под землей. Для расширения представлений об инновационных технологиях для туннелей и метрополитенов мы остановились на другой работе их США [23].

Сложности с построением метро и туннелей, особенно глубокого залегания, нуждается в получении точной информации о грунте и горных породах для конкретного участка и является решающим и важным шагом при планировании и проектировании любого геотехнического строительного проекта. Однако подземные слои почвы / породы создаются естественными формирующими материалами, связанными с присущей им неоднородностью и хаотичностью. Следовательно, при проектировании и строительстве геотехнической системы, которая либо встроена, либо основана на подповерхностных грунтах, необходимо учитывать эти пространственные вариации наложения грунта / породы и инженерные свойства каждого идентифицированного слоя [23]. Из-за неспецифических знаний истории почвообразования и / или другой предшествующей геологической и антропогенной деятельности, подземную информацию на проектной площадке может быть трудно установить. Бурение и отбор проб для получения каротажных диаграмм, наряду с различными испытаниями на месте, обычно выполняются транспортными агентствами и / или геотехническими консультантами в США для определения подземных профилей почвы и горных пород и связанных с ними инженерных свойств. Однако на практике для любого определенного проекта проводится лишь ограниченное количество каротажных диаграмм и зондирования на месте, частично из-за ограниченного бюджета и частично из-за сжатого графика проекта. В результате геологическая и геотехническая информация может быть исследована только в географически распределенных местах, тогда как информация о недрах в других местах, возможно, придется вывести на основе имеющейся информации либо из архивных данных, либо данных запланированных исследований площадки. Неспецифическая осведомленность о процессе формирования геологических тел в сочетании с недостаточным количеством каротажных диаграмм и результатов натурных испытаний приводит к значительной неопределенности в предполагаемой модели геологической среды. Справедливо сказать, что проблемы, возникшие в результате неопределенности геологических условий и влияния такой неопределенности на геотехнический проект, долгое время были проблемой, с которой сталкивались специалисты-практики. Чтобы быть более конкретным, эти проблемы можно резюмировать ниже [23].

- Доступные данные исследования площадки поступают из нескольких источников с различной степенью точности, достоверности и разрешающей способности (например, бурение скважины и отбор проб почвы по сравнению с испытаниями на месте по сравнению с геофизическими измерениями или исторические архивы по сравнению с текущими исследованиями), следовательно, существует проблема

для последовательного и обоснованного объединения данных;

- Доступная информация о недрах географически распределена и, как правило, немногочисленна, что требует рациональных методов интерпретации;

- Отсутствует методология, позволяющая инженерам оценить уровень уверенности после того, как он или она разработали интерпретированную информацию о слоях грунта / породы и связанных с ней свойств грунта / породы для последующего проектирования и строительства;

- Инженеры тратят огромное количество времени на завершение интерпретации и представления моделей геологической среды, в то время как интерпретация часто полагается на субъективное инженерное мнение и предпочтение инженеров упрощения;

- Текущие методы интерпретации в лучшем случае дают детерминированную модель, в которой количественная оценка неопределенностей (или уровня достоверности) такой модели отсутствует, и влияние таких неопределенностей на последующий инженерный анализ / проектирование геотехнических систем не может быть рассмотрено на данном этапе.

Исследовательская группа из Дейтонского университета приложила значительные усилия для разработки трансформационных методологий для преодоления этих вышеупомянутых проблем, при этом рано осознавая, что цифровые данные геотехнической разведки станут более доступными [23]. Эта трансформация в эпоху цифровых данных была продвинута за счет принятия передовой практики управления геотехническими данными (GDM), как это происходит в ODOT, и появления общих согласованных форматов данных для геотехнических данных [23].

Из-за недостаточного знания истории почвообразования и / или деятельности человека, подповерхностные слои почвы трудно определить. Неопределенность геологических условий и ее влияние на геотехническое проектирование уже давно являются проблемой, с которой сталкиваются практики строительства. Недавно геоинститут ASCE разработал систему обмена данными для специалистов по геотехнике и геоэкологии (DIGGS), которая представляет собой стандартную схему для передачи геотехнических данных между несколькими организациями [23]. Она открывает путь к совместному использованию и объединению наборов данных и формирует структурную базу данных для дальнейшего моделирования и анализа на основе данных. Отдел геотехнических разработок ODOT (OGE) США играет ведущую роль в стране в поддержке усилий DIGGS по развитию и, следовательно, делает этот проект возможным. В этом исследовании данные исследования площадки в формате DIGGS и архивном формате обрабатываются совместно. Инновационная методика, разработанная исследовательской группой, была усовершенствована для лучшего применения в реальных проектах. Байесовское машинное обучение интегрировано с марковскими моделями случайного поля для вывода и моделирования геологических моделей и геопространственных данных с количественной неопределенностью. Пространственная неоднородность и статистические характеристики

моделируются в терминах статистических и пространственных закономерностей. Эти закономерности служат основой для обеспечения синтезированной интерпретации профилей почвы с количественной оценкой неопределенности [23].

Использование информационного моделирования зданий (BIM) в последние годы расширилось в проектировании конструкций и инфраструктуры в США. Однако программное обеспечение BIM обычно игнорирует информацию о геологии и свойствах подземного грунта, считают в [23]. Это существенный недостаток, поскольку основная идея BIM заключается в сокращении затрат за счет снижения риска на ранней стадии проектирования и на протяжении всего срока реализации проекта. В последнее время принципы BIM были применены к инженерно-геологическому проектированию, чтобы помочь снизить неопределенность и улучшить практику исследования площадки, что в конечном итоге поможет снизить риски и затраты. По сути, концепция BIM, расширенная до геотехнической инженерии, требует разработки новых алгоритмов геологического моделирования, переходящих от традиционной парадигмы, основанной на опыте, к более продвинутой парадигме, основанной на данных. Более того, вместо детерминированной интерпретации данных исследования площадки, непосредственно основанной на субъективном суждении инженеров, необработанные данные могут обрабатываться, анализироваться и моделироваться с использованием вероятностных моделей и байесовской системы вывода, так что возможные пространственные закономерности могут быть извлечены автоматически с использованием методов ИИ с возможностью количественной оценки неопределенности. Парадигма, основанная на данных, более объективна, и уровень достоверности предполагаемых результатов может быть вычислен с использованием принципов байесовского машинного обучения. Возможность количественной оценки неопределенности является ключевой особенностью, которая отличает BIM в инженерно-геологическом проектировании от аналога для наземных конструкций [23].

Кроме того, по мере того, как все больше и больше данных исследования участков собираются и хранятся в стандартизированных форматах, теперь можно автоматически обмениваться, передавать, импортировать, экспортировать и обрабатывать геотехнические данные через Интернет, что открывает путь к разработке веб-приложений для масштабируемых Подземная BIM-платформа на базе искусственного интеллекта.

Цифровые данные - это ядро и средство достижения преимуществ BIM. Для успеха BIM необходимо использовать общие согласованные форматы для представления данных. Что касается геотехнических данных, то в Великобритании и в различных частях мира есть хорошо разработанные и общепринятые стандарты, опубликованные AGS (Ассоциация геотехнических и геоэкологических специалистов). В Соединенных Штатах формат DIGGS (обмен данными для специалистов в области геотехники и геоэкологии), за который выступают ASCE и FHWA, начинает



становиться предпочтительным форматом. Оба формата позволяют передавать геотехнические и геоэкологические цифровые данные внутри организаций и между ними [23]. Есть и исследования практик применения легальных 3D моделей геоданных в ЕС [35].

То, что практика строительства туннелей и других подземных сооружений движется в сторону стандартного вовлечения геоданных в легальный BIM, можно увидеть в другой публикации, размещенной на сайте ведущего производителя программного обеспечения BIM Autodesk [25]. В ней можно прочитать о развитии геотехнического BIM с конкретным применением программно-технических решений к строительству туннелей:

«Невидимые подземные условия грунта - одна из самых больших областей риска и неопределенности в любом строительном проекте. Фактически, сообщалось, что более трети строительных проектов с перерасходом указывают на непредвиденные грунтовые условия как на основную причину перерасхода. Принципы BIM могут быть применены к геотехнике, чтобы помочь уменьшить неопределенность и провести более качественное исследование площадки, которое подходит для проекта и, в конечном итоге, поможет снизить риски и затраты. В этой области много сложных проблем; южный портал маршрута туннеля - это место снесенного газового завода. Почва в этом районе загрязнена, и еще есть остатки подземного фундамента завода. На южном и северном берегах предполагаемое расположение туннеля приближается к основанию пилона канатной дороги Emirates Air Line. Кроме того, портал туннеля на северном берегу находится в районе теперь уже заполненного западного входа в док Royal Victoria и некоторых снесенных складов. Подобно газовым работам на южном берегу, все еще есть подземные остатки этих объектов».



Рис. 10. Проблемы, связанные с выравниванием туннеля Сильвертауна [25].

Маршрут туннеля должен будет пролегать через промышленно развитые районы Лондона; участки, которые содержат много различных грунтовых условий, дорог, фундаментов и других подземных сооружений. На рисунке 10 показаны общие проблемы, связанные с выравниванием туннеля Сильвертауна.

Atkins, как головной исполнитель проекта [25], осознал, что для снижения общих затрат и рисков проекта им нужен лучший способ визуализации и понимания грунтовых условий в контексте существующих условий строительства и более широких проблем на площадке. Поэтому был применен подход геотехнического BIM. Один из других примеров применения этого подхода заключался в том, чтобы иметь лучший способ оценки количества загрязненной почвы, на которую будет воздействовать строительство. Стоимость обработки загрязненных материалов делает точные расчеты объема жизненно важными для оценки финансовых последствий [25].

### III. ТBM И СТАНДАРТЫ PAS ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ТУННЕЛЕЙ – РАЗВИТИЕ В ВЕЛИКОБРИТАНИИ

Выше мы уже обсуждали особую роль стандартов PAS в развитии прорывных цифровых технологий для подземного строительства и BIM. В российской практике сегодня также началось практическое применение такого рода подходов к стандартизации в виде формата предварительного национального стандарта РФ или ПНСТ, создающихся примерно также как и PAS. Приведем пример по стандартам на цифровые двойники, которые крайне полезны и в обсуждаемой нами теме [26].

Известно, что сегодня при строительстве туннелей и метрополитенов широко применяются ТBM Тоннелепроходческий комплекс (также тоннелепроходческая машина, тоннелепроходческий механизированный комплекс, ТПМК) — общее название различных агрегатов, предназначенных для прокладки туннелей, с круглым поперечным сечением. Существуют машины для различных типов поверхности — от твердого камня до песка.

Тоннелепроходческий комплекс выполняет механизированное разрушение забоя, отгрузку разрушенной породы, возведение крепи. К числу тоннелепроходческих комплексов относятся механизированные проходческие щиты, проходческие комбайны, тоннельные комплексы. Существуют тоннелепроходческие комплексы для сооружения туннелей с монолитной пресбетонной обработкой стен, машины (щиты) для строительства туннелей из труб, микрощиты, а также щитовые комплексы для открытых работ. Применение подобных машин обладает преимуществом перед буровзрывным способом тем, что не слишком затрагивает окружающий грунт и позволяет скорее добиться ровных стенок будущего туннеля. Недостатком, в свою очередь, является их высокая стоимость и трудности с транспортировкой к месту работ

[[https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%BE%D0%B4%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9\\_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%BE%D0%B4%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81)].

Так, сегодня с помощью ТBM, строятся самые большие железнодорожные и автомобильные туннели, а также

конечно и метрополитены. На борту ТВМ уже находится значительное количество сенсоров, позволяющих определять многие окружающие параметры внешней среды включая местоположение ТВМ (маркшейдерскую точность никто не отменял – она просто стала электронной), и поэтому возникла вполне инновационная идея сделать управление работой ТВМ согласованной с показаниями этих сенсоров и данными BIM, в том числе и геотехнического. Происходит и расширение сенсоров в ТВМ, который подобно автомобилям CAV/AV[36,37,38] начинает обзаводиться своими органами зрения состояния подземного мира. Однако, чтобы это сделать надо, чтобы производители ТВМ и практики туннелестроения стали применять нужные признанные стандарты и легальные модели BIM.

Уже после успешного завершения проекта метро Crossrail было объявлено о подготовке Crossrail 2 и несколько ранее было выпущено два интересующих нас стандарта, регламентирующих применение ТВМ в создании туннелей - PAS 8810 [16] и PAS 8812:2016 [17]. Стандарт PAS 8810:2016 Tunnel design. Design of concrete segmental tunnel linings. Code of practice был посвящен сегментной футеровке туннелей, которые в настоящее время проектируются с учетом большого количества стандартов и документов о чем мы уже говорили выше. Настоящий PAS объединяет все это в единый удобный для использования документ по стандартизации, который направлен на сокращение ненужного администрирования и задержек за счет оптимизации, уточнения и стандартизации процесса проектирования сегментной футеровки.

В этом стандарте даны рекомендации по проектированию бетонных сегментных перекрытий туннелей. Он охватывает вопросы проектирования от начала проекта до конца срока службы туннеля, как собственно, декларируется в правилах BIM.

На ранней стадии проектирования изучение вариантов выбора отделки туннеля не ограничивается бетонными сегментными обделками туннеля. Так, разделы с 4 по 8 этого PAS охватывают общие аспекты проектирования туннелей, а разделы с 9 по 12 дают конкретные технические рекомендации по элементам футеровки из сборного железобетона для сегментной футеровки туннелей. PAS 8810 содержит подробные рекомендации со ссылкой на существующие национальные и международные отраслевые стандарты. Он также включает конкретные рекомендации по проектированию элементов дизайна, недоступные по нашему мнению в других стандартах.

PAS 8810 охватывает следующие дисциплины: функциональные требования, концептуальный дизайн, характеристики породы и земли, дизайн и спецификацию материалов, характеристику материалов и испытания, расчет предельного состояния, конструкцию бетонной сегментной футеровки, моделирование футеровки бетонного сегмента, контрольно-измерительные приборы и мониторинг управления дизайном. Он не распространяется на:

туннели с напылением из бетона, туннели, облицованные монолитным бетоном, любую футеровку туннеля из материала, отличного от бетона, например чугуна или стали с шаровидным графитом и т.д.

Второй PAS 8812:2016 Temporary works - Application of European Standards in design – Guide содержит руководство по применению европейских стандартов при проектировании временных сооружений в строительстве туннелей. Он направлен на установление единого подхода к проектированию в процессе строительства временных работ.

PAS 8812 помогает проектировщикам выбрать наиболее подходящий стандарт для принятия при планировании временных работ. Это связано с передачей ключевых проектных данных и информации на всех этапах цикла проектирования. Он включает в себя рекомендации по подходящим частным факторам и комбинации действий, руководство по подходящим подходам к анализу, повторному использованию оборудования, взаимосвязи между Еврокодами и другими соответствующими стандартами и разъяснение требований к проектированию для определенных групп временных работ.

Инициаторами принятия этих двух стандартов Великобритании были всего две организации The British Tunnelling Society (BTS) и High Speed 2 (HS2), о которых мы расскажем далее.

Британское туннельное общество или BTS (<https://www.britishtunnelling.org.uk/?sitecontentid=E0ED6155-DC50-4CE1-BFF3-7BB452B5F66F>) является

ассоциированным обществом Института инженеров-строителей (ICE). В настоящее время оно насчитывает 855 индивидуальных членов и 74 корпоративных члена, поэтому это одно из самых ярких собраний профессиональных тоннельщиков в мире. Созданное в 1971 году, BTS служит для обеспечения форума для встреч и обсуждения вопросов, связанных с туннелями. BTS также публикует отраслевые руководства и свод правил, проводит учебные курсы для повышения квалификации специалистов по туннелям; активно поддерживает привлечение молодых людей в отрасль; признает превосходство в проходке туннелей; спонсирует и поддерживает отраслевые конференции; и консультирует правительство и широкую общественность по вопросам туннельной индустрии, в которой среди множества заказчиков выделяются железные дороги, метрополитены и автомобильные трассы. Новым потенциально крупным заказчиком является Hyperloop.

Как было отмечено в работе [8] для успешности проектов Hyperloop резкое снижение стоимости прокладки туннелей. Концепция транспортировки по гипер-петле со скоростью до 1200 км / час в капсулах, перемещаемых на магнитной подвеске в условиях вакуума в трубопроводах, предусматривает выемку породы для построения обширных подземных транспортных сетей. Жизнеспособность таких подземных гиперпетлевых систем будет во многом зависеть от стоимости прокладки туннелей. Илон Маск и его компания Hyperloop One, как один из нескольких разработчиков систем Hyperloop, предположили, что эта

концепция жизнеспособна только в том случае, если стоимость туннелирования снизится в десять или более раз. Его мысли о достижении этого включают в себя рытье туннелей меньшего диаметра, удвоение мощности туннельных бурильных машин, использование непрерывного процесса земляных работ и футеровки, а также инвестирование в исследования и разработки и использование преимуществ экономии на масштабе [8, 27]. Кроме этих подрывных инноваций компании Илон Маска активно используют BIM и заключили отдельное соглашение о развитии цифровых инноваций для целей строительства с упомянутой выше ведущей мире по теме BIM компанией Autodesk [8].

Принимая к сведению эти утверждения и предложения Илона Маска, Британское туннельное общество (BTS) Института инженеров-строителей (ICE) в Великобритании провело исследование осуществимости и практичности создания системы Hyperloop для Великобритании и опубликовало крайне интересный отчет на эту тему [27].

В рамках этих работ по подготовке отчета [27] BTS были рассмотрены технические последствия и преимущества строительства туннелей для систем Hyperloop, а также факторы затрат на туннелирование и возможность сокращения этих затрат. BTS также рассмотрел текущие инновации и исследовательские проекты, которые могут помочь в достижении технической осуществимости и желаемого сокращения затрат [27]. Так как этот отчет [27] систематически излагает тематику подземного строительства, в целом важную для понимания темы, то мы приведем из него некоторые выдержки.

Стоимость туннелирования в значительной степени зависит от скорости проходки, как сказано в [27]. Модели туннелей, являющиеся основой в этом отчете, использованы предварительные ставки, которые являются разумными с текущей практикой туннелирования и предполагают, что выемка грунта и футеровка являются основными компонентами цикла проходки туннелей и происходят последовательно. В отчете действительно указаны некоторые достижения в технологии, которые использовались, но еще не получили широкого распространения. В частности, это то, что может позволить проводить облицовку и земляные работы параллельно. Эти достижения более вероятно, будут достижимы в среде Hyperloop с очень большими радиусами кривой, чем в типичных радиусах для метро или даже в среде высокоскоростной железной дороги [27].

На основе данных, которые использовались в отчете за 2018 год, была подготовлена диаграмма, показывающая стоимость за м3 против длины туннеля и с добавлением туннелей Crossrail, агрегированных с добавлением соответствующих затрат на портал из этих отдельных контрактов. Стоимость модельного туннеля снижена к затратам 2016/2017 гг.

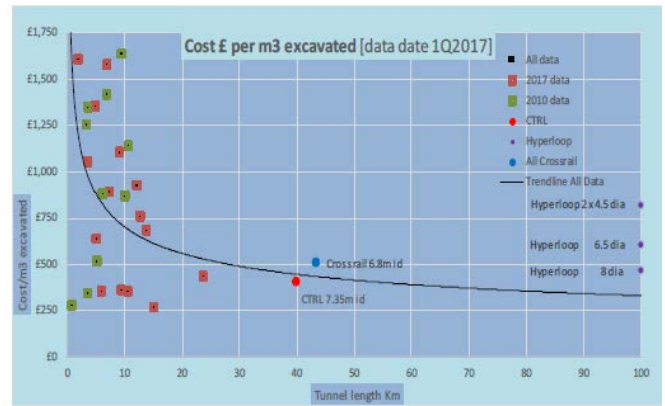


Рис. 10а. Стоимость создания м3 в фунтах стерлингов [27]

Из множества инноваций для прокладки туннелей обсуждаемых в [27] мы выбрали первую в списке – работу ТВМ спиральными сегментами. Спиральные сегменты или спиральная футеровка могут увеличить скорость туннелирования за счет включения кольцевого возведения и земляных работ, которые могут быть непрерывными параллельными процессами (рисунок 11).

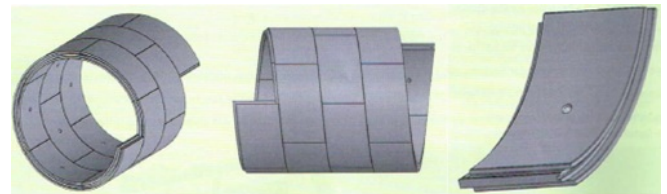


Рис. 11. Работа ТВМ спиральными сегментами [27]

Кроме этой работы [27] на сайте британского туннельного общества размещено достаточно много другой полезной информации, но она не является предметом настоящей статьи.

Второй спонсор и автор стандартов, регламентирующих применение ТВМ PAS 8810 [16] и PAS 8812:2016 [17] это High Speed 2. High Speed 2 (HS2 [https://en.wikipedia.org/wiki/High\\_Speed\\_2](https://en.wikipedia.org/wiki/High_Speed_2)). HS2 это планируемая высокоскоростная железная дорога в Соединенном Королевстве, первая фаза которой находится на ранних стадиях строительства, а будущие стадии получили утверждения в 2020 году. HS2 станет второй крупной высокоскоростной железнодорожной линией в Великобритании; первая ВСМ - High Speed 1 (HS1), которая соединяет Лондон с туннелем под Ла-Маншем и была открыта в середине 2000-х годов. По завершении строительства железная дорога свяжет Лондон, Бирмингем, Манчестер и Лидс новой Y-образной сетью из путей со скоростью 360 км / ч (225 миль в час).

High Speed 2 обеспечит модернизацию конечных станций Лондона Юстон, Манчестер Пикадилли и Лидса, а Бирмингем будет обслуживаться новой конечной станцией, известной как Бирмингем Керзон-стрит. Эта ВСМ также предоставит четыре новых сквозных станции: Old Oak Common в западном Лондоне, чтобы соединиться с Crossrail и Overground; с Бирмингемской развязкой в Солихалле для соединения с аэропортом Бирмингема и обслуживания

Национального выставочного центра; с Manchester Interchange в южной части Манчестера, чтобы соединиться с трамваями аэропорта Манчестера и Metrolink; и с East Midlands Hub в Лонг-Итоне, который будет обслуживать Ноттингем и Дерби через трамвайную систему Nottingham Express Transit.

Мотивация проекта High Speed 2 заключается в увеличении пропускной способности железнодорожной сети для удовлетворения растущего числа пассажиров. Убрав большинство экспресс-сервисов с существующей железной дороги, можно будет запустить дополнительные местные сервисы. Новая высокоскоростная железная дорога оказалась более рентабельной и менее разрушительной, чем модернизация существующей сети [28] в этой части Великобритании, но модернизация существующей железной или предприятие Digital Railway (цифровая железная дорога) получила финансирование на реализацию большого проекта в 2020 году чуть позже, чем HS2 [39].

Согласно плану Digital Railway (цифровой железной дороги) [39], традиционная сигнализация на участке магистрали Восточного побережья будет заменена цифровой системой, которая позволит персоналу видеть точное местонахождение поезда на протяжении всего пути.

Эта оживленная линия используется как пассажирскими, так и грузовыми поездами. В объявлении о начале работ министерство транспорта заявило, что новая «умная» сигнализация будет распознавать разные типы поездов, «позволяя поезду и пути постоянно общаться друг с другом в режиме реального времени» [39].

Модернизация линии - лишь один из элементов плана правительства по созданию железнодорожной сети 21 века, которая поможет распространить благосостояние во всех частях страны. Треть населения Соединенного Королевства живет в пределах 20 минут от станции магистрали Восточного побережья, и вместе они производят 41% ВВП [40]. О проекте цифровая железная дорога и его стандартах можно прочитать в [3, 41 - 45]. Так как применение BIM на проектах такого размера является обязательным, то он будет активно использован при этой модернизации.

Еще один большой туннельный проект Туманного Альбиона это - Crossrail 2 [54]. Crossrail 2 - это предполагаемый железнодорожный маршрут в Юго-Восточной Англии, который проходит от девяти станций в Суррее до трех в Хартфордшире, обеспечивая новое железнодорожное сообщение Север-Юг через Лондон. Он соединит Юго-западную главную линию с главной линией Западной Англии через Викторину и Кингс-Кросс Сент-Панкрас. Он призван уменьшить серьезную перенаселенность, которая в противном случае могла бы возникнуть на маршрутах пригородных поездов в центр Лондона к 2030-м годам [54]. В случае получения разрешения ожидается, что строительство начнется примерно в 2023 году, а новая линия откроется в начале 2030-х годов [54]. Стоимость проекта оценивается в 31,2 миллиарда фунтов стерлингов [54]. Борис Джонсон, будучи мэром Лондона, призвал назвать эту линию «линией Черчилля» в честь Уинстона Черчилля [54].

Линия является четвертым крупным железнодорожным проектом в столице с 2000 года (расширение линии в Восточном Лондоне открылось в мае 2010 года, программа Thameslink открылась в 2018 году, а Crossrail 1 откроется полностью, возможно, в 2021 году). Прогнозы National Rail о перенаселенности, в том числе в пригородах и туристических направлениях, менее хорошо обслуживаемых метрополитеном, привели к призыву к строительству большого количества новых линий [6], а предложения по пересечению Лондона приобрели большее значение, поскольку Юстон был назван конечной станцией метро [54].

Таким образом в Великобритании сформирован пул подрывных инновационных проектов на железнодорожном транспорте в значительной мере использующий туннельной и подземное строительство. Это High Speed 2, Digital Railway (цифровая железная дорога) и Crossrail2.

Ожидается, что реализация эти трех мегапроектов даст улучшение транспортной связности, окажет положительное влияние на экономику в плане выхода из кризиса вызванного пандемией COVID 19, и что благоприятное время в пути и большая пропускная способность приведут к переходу от воздушного и автомобильного транспорта к железнодорожному. Стоит заметить, что именно применение туннелей в этих проектах и, в частности в проекте HS2, было одним из важнейших факторов их экономической рентабельности [28], позволивших начать строительство HS2 уже в 2020 году.

Причин для этого много и технического и, например, экологического характера. Туннелирование часто необходимо на железнодорожных линиях, где из-за холмистого ландшафта невозможно выровнять путь без крутых уклонов, которые несовместимы с железнодорожными операциями, как сказано в отдельном документе HS2 [29]. Туннели также были включены в Предлагаемую схему HS2 и по экологическим причинам, например, для прохода под застроенными территориями, где нарушения на поверхности могут быть серьезными. На этапе 2а в HS2 запланировано использование следующих видов туннелей [29]:

- проходной туннель (также называемый зеленым туннелем) - в котором вырывается траншея и в траншее сооружается бетонная конструкция с основанием, крышей и стенами. Затем для засыпки траншеи и покрытия верхней части используется засыпной материал и почва. Затем земля наверху восстанавливается и выравнивается, чтобы вписаться в окружающий ландшафт. Небольшая часть (около 200 м) южной части туннеля Уитмор будет закрыта. См. Рисунок 12 ниже, где показано поперечное сечение типичного туннеля «вырезать и закрыть»;

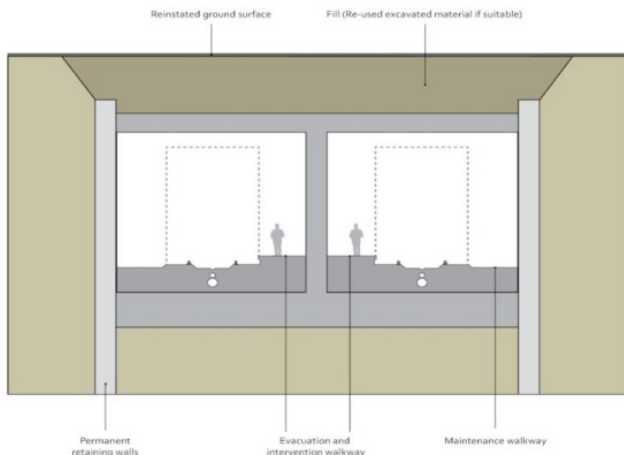


Рис. 12. Поперечное сечение типичного туннеля «вырезать и закрыть» [29]

- пробуренные туннели - где строятся два параллельных туннеля, каждый из которых содержит одну железнодорожную колею. Это может быть сделано либо с использованием туннельных буровых машин (ТБМ), либо путем рытья однострунных туннелей с помощью механической установки. Предлагаемая схема включает примерно 2 км туннелей с двумя стволами (туннели Уитмор и Мадли). Планируется, что они будут иметь внутренний диаметр 8,8 м.

По соображениям безопасности, если длина пробуренных туннелей превышает 500 м, они должны иметь поперечные проходы для соединения двух стволов туннелей, а также пути эвакуации, которые проходят по всей длине туннеля и соединяются с поверхностью через порталы туннелей. Перекрестные переходы и пути эвакуации необходимы для обеспечения безопасных путей выхода и доступа аварийных служб в случае возникновения чрезвычайной ситуации. На рисунке 13 ниже показано типичное поперечное сечение туннеля с двумя буровыми отверстиями и поперечным проходом [29].

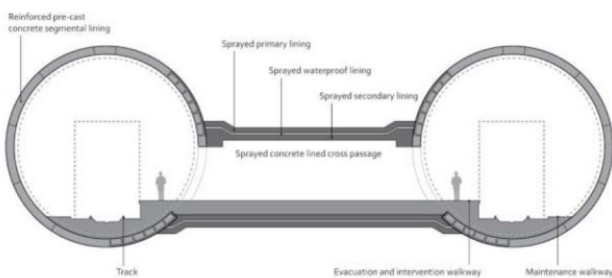


Рис. 13. Поперечное сечение типичного туннеля с двойным стволом с поперечным проходом пути эвакуации [29].

Для отдельных туннелей были разработаны специальные документы в HS2 [30] и крупнейшая площадка HS2 г уже готовится к первым ТБМ [31] и рисунок 14. Подготовка крупнейшей строительной площадки проекта на южном портале Chalfont Lane, на участке двухтрубных туннелей Chilterns, продвигается в преддверии прибытия первого ТБМ, который будет

запущен в начале 2021 года, а в конце 2020 года появятся первые две машины переменной плотности немецкой компании Herrenknecht.



Рис. 14. Вид самой большой строительной площадки на HS2 [31].

Эту площадку в прессе часто называют космодромом и рядом с ней начаты работы по строительству завода по производству сборного железобетона, на котором будет отлито более 118 000 сегментов. После сборки двумя ТБМ диаметром 10,26 м будут копать 16-километровые двухтрубные рельсовые туннели через холмы Чилтерн до участка недалеко от Южной пустоши в Бакингемшире.

Ожидается, что на пике проекта в проектировании и строительстве туннелей Чилтерн и виадука будут задействованы 1200 человек, включая 50 возможностей для учеников. Двойные туннели Chiltern с пятью вентиляционными шахтами являются самыми длинными и глубокими на маршруте от конечной станции Euston Station в Лондоне до конечной станции Curzon Street Station в Бирмингеме. Грязь туннелей будет повторно использована для озеленения территории.

Однако каким бы способом не строились туннели или иные сооружения и здания на HS2, применение BIM на HS2 будет тотальным и, видимо, самым масштабным в мире на ВСМ. Еще в 2013 году началась масштабная подготовка к этому по плану, изложенному в [32]. Для обеспечения первой фазы проекта HS2 определила BIM как центральную стадию строительства железной дороги, признавая, что это серьезное обязательство использовать BIM максимизирует и гарантирует, что HS2 будет доставлен в срок, в рамках бюджета и что проект будет надежным.

Информационная модель здания HS2 сформирует «информационную основу» сети HS2 на протяжении всего жизненного цикла проекта. От разработки технико-экономического обоснования до реализации и окончательной эксплуатации железной дороги она будет расти и развиваться вместе с проектом, в конечном итоге превратившись в информационную модель активов для High Speed 2.

BIM будет доставлять данные и управлять ими в пространственно связанном и последовательном

формате, который способствует взаимодействию данных и обеспечивает совместную работу. Эти последовательные и согласованные данные будут использоваться для планирования, строительства, эксплуатации и технического обслуживания железной дороги в течение многих лет.

Таким образом, HS2 считает, что соблюдение BIM в контрактах имеет решающее значение для долгосрочного успеха проекта. HS2 указывает, что BIM будет способствовать более глубокому пониманию конструкции и ее требований, что приведет к лучшему определению и управлению рисками и, следовательно, снижению затрат. BIM также будет использоваться для проверки и подтверждения требований.

На изображении (рисунок 15) ниже показано видение HS2, связанное с работой в среде BIM: синие и пурпурные элементы обозначают виртуально создаваемую цифровую железную дорогу, проверяя, что каждый аспект предлагаемого плана HS2 будет соответствовать плану, быть надежным и высококачественным. Ниже серым цветом изображена «дорога в ад», по которой железнодорожная сеть строится по старинке.



Рис. 15. Видение HS2 в среде BIM (HS2 Ltd) (Изображение получено из <http://www.bimplus.co.uk/news/hs2-plans-carrot-and-stick-incentivise-contractors/> и есть в [32])

#### IV. ЛЕГАЛЬНЫЕ BIM МОДЕЛИ ДАННЫХ И IFC TUNNEL, IFC ALIGNMENT, IFC ROAD, IFC RAIL

Многие воспринимают стандарты IFC как нечто неизбывное, между тем эти модели BIM упорядочивают данные на геометрическом и пространственном уровнях в той мере, которая, по мнению экспертов, является общей для всего домена. Изменяя IFC, легко дополнить сгенерированную базовую модель элементами для конкретного проекта. Такие элементы обычно состоят из визуального компонента, который связан с геометрией модели, и информационного компонента, который связан с геометрией элемента. Информация всегда доступна через геометрическую модель и интуитивно организована. Кроме того, концепции BIM охватывают весь жизненный цикл модели здания, от планирования до этапов эксплуатации, что имеет решающее значение для высокотехнологичных проектов, таких как проекты туннелей. Стоит, впрочем, помнить, что необходимо

иметь соответствующую онтологическую квалификацию при расширении моделей IFC, чтобы не разрушить легальность этих моделей.

В последнее время концепции BIM используются для решения проблем моделирования взаимодействия при механизированном туннелировании, открывая тем самым интерактивное использование этих моделей в процессах реального времени при создании туннелей, в котором легальность этих моделей очень важна. Прогресс в этих инновациях хорошо виден на примере научных работ. Если в диссертации 2013 года [47] рассматривался правильный, но статический вариант информационной модели туннеля то уже в 2017 году в работе [46] излагалось применение четвертого измерения (времени) BIM для управления TBM с помощью моделей IFC Tunnel, которая быстрыми темпами развивалась в европейских университетах. В статье [9] говорилось о том, что все инфраструктурные стандарты IFC, за исключением IFC Tunnel, получили статус кандидатов в стандарты и выставлены для всеобщего обсуждения. В отличие от рабочих групп IFC Bridge, IFC Alignment и IFC Road, которые организованы и координируются ассоциацией buildingSMART, до сих пор разработки, проводимые в моделях туннельных продуктов, в основном продвигались и поддерживались исследовательскими группами в академических кругах. Первое предложение модели туннельного продукта было опубликовано Yabuki (Ябуки) из Университета Осаки в Японии [48]. В этом первом предложении Ябуки сосредоточился на разработке двух основных аспектов [49]: (1) описание облицовки защитных туннелей, которое является наиболее часто используемым методом строительства в Японии; и (2) описание грунтовых условий, в которых расположены туннели.

После нескольких лет бездействия, когда модель продукта не получила дальнейшего развития или внедрения, в начале 2010-х Ябуки и другие соавторы начали пересмотр модели продукта. Для этой второй версии исследовательская группа расширила доступные семантические объекты и реализовала обмен данными о туннелях между Autodesk Revit Structure и Google SketchUp с помощью файлов данных IFC [48].

Несмотря на улучшения, представленные во второй версии модели продукта, два ее основных ограничения не были устранены. Во-первых, предложение Ябуки содержало большое количество сущностей, которые могут быть сокращены с помощью счетчиков. Например, каждый тип сегмента кольца, используемый на облицовке, определялся отдельным объектом, что требовало больших усилий по реализации только для поддержки отдельной геометрии. Второе ограничение касалось того, что модель продукта не покрывает, то есть внутреннего пространства. В частности, внутренняя часть туннеля включает в себя большое количество установок, которые не могут быть описаны типичными объектами IFC, и отсутствие которых делает предложение Ябуки неполным [48]. Тем не менее, поперечное сечение туннеля с двойным экраном с указанием его семантических сущностей, как описано в модели продукта IFC-ShieldTunnel (рисунок 16) стало основой для дальнейшего развития IFC Tunnel.

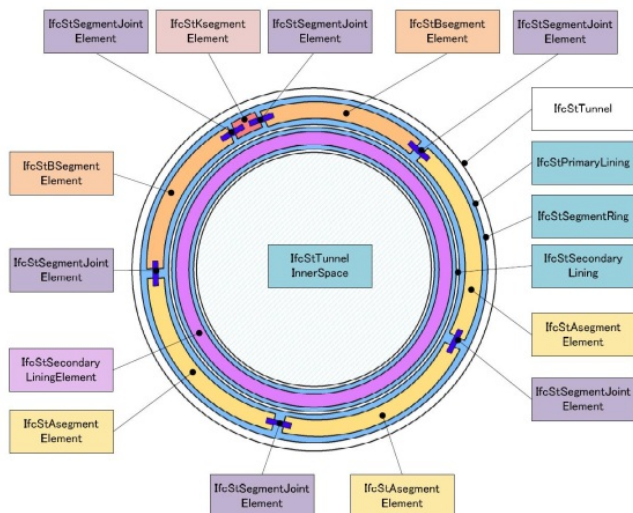


Рис. 16. Поперечное сечение туннеля с двойным экраном с указанием его семантических сущностей, как описано в модели продукта IFC-ShieldTunnel [48].

Второе предложение академических кругов стало результатом совместных исследований Рурского университета Бохума (RUB) и Технического университета Мюнхена (TUM) в Германии. С одной стороны, исследовательская группа во главе с Vogtmann (Боррманном) из TUM разработала модель туннельного продукта, которая устраняет два основных ограничения предложения Ябуки [48]. Это новое предложение использовало счетчики, чтобы минимизировать количество новых объектов, вводимых в схему, и определяло полный набор пространств, способных определять большое количество установок, расположенных в туннеле метро. Кроме того, исследовательская группа Боррманна представила в IFC концепцию многомасштабных моделей, включив описание, основанное на нескольких уровнях детализации (LoD) [48]. Наконец, был опубликован первоначальный набор примеров защитных туннелей, основанных на их предложении, с целью открыть расширение IFC для дальнейших разработок и обсуждений [48]. Заметим что в TUM, который считается самым престижным учебным заведением Германии, уже с 2014 года публикуется для исследователей и в том числе для студентов пособие по IFC Tunnel [49], что позволило создать отличную школу по созданию легальных моделей данных IFC Tunnel для конкретных проектов.

С другой стороны, исследовательская группа под руководством König (Кёнига) из RUB (это один из самых молодых немецких университетов – он основан после второй мировой войны) разработала модель продукта для туннельных бурильных машин (ТВМ), в которой реализованы разработки, сделанные в TUM). В частности, исследования, проведенные в RUB, были включены в исследовательский кластер DFG5 SFB6 837, основной целью которого была разработка интегрированной модели продукта, способной консолидировать и управлять различными источниками информации при строительстве туннелей. Эта

интегрированная модель продукта была определена четырьмя различными частными моделями, а именно моделью недр, ТВМ или машинной моделью, моделью туннеля и моделью здания (поверхности) [48]. Чтобы проверить свой подход, исследовательская группа разработала средство просмотра моделей, которое было применено в реальном тематическом исследовании проекта метро на основе Wehrhahn-Linie в Дюссельдорфе [50].

В проектах механизированных туннелей крупномасштабные трехмерные численные модели все чаще используются в качестве инструментов прогнозирования на этапах планирования и строительства. В этой диссертации [50] были разработаны передовые вычислительные стратегии для решения некоторых нерешенных проблем, присущих моделированию процесса проходки туннелей. В первой части разрабатывается новая вычислительная среда для одновременного моделирования движения ТВМ и процессов выемки грунта во время проходки туннелей вдоль произвольных трасс с использованием FE-метода. Кроме того, на основе проектных данных метро WEHRHAHN-LINE в Дюссельдорфе разработан и продемонстрирован полностью автоматический разработчик моделей проходки щитов на основе BIM. Во второй части представлен новый подход, основанный на сочетании метода расширенной предполагаемой деформации (EAS) и метода встроенной сильной неоднородности (ESD) для анализа разрушения при сдвиге, который применяется для точной оценки устойчивости забоя туннеля и прогнозирования потенциального механизма обрушения забоя [50]. Снимок экрана программы просмотра модели IFC tunnel, разработанной для моделирования строительства туннельных ограждений туннельно-проходческими машинами мы приводим на рисунке 17.

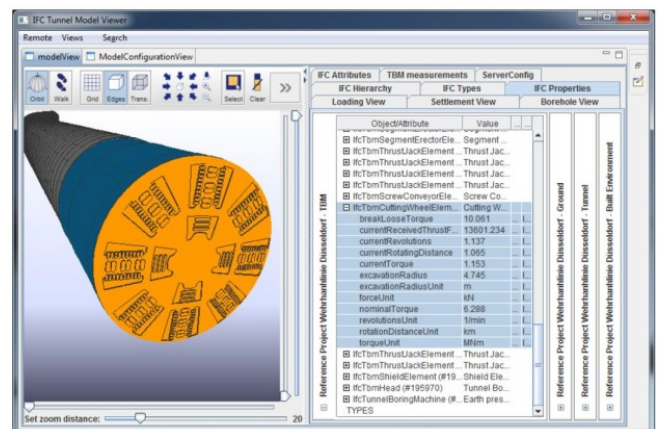


Рис. 17. Снимок экрана программы просмотра модели IFC tunnel, разработанной для моделирования строительства туннельных ограждений туннельно-проходческими машинами [48].

Учитывая, что современное состояние проектирования многомасштабной инфраструктуры подразумевает совместное с IFC tunnel использование других инфраструктурных моделей IFC, мы приводим их описание ниже для нашего читателя.

### IFC Alignment

Проект «Выравнивание инфраструктуры и система пространственной привязки», также известный как IFC Alignment, был первым официальным расширением готовящегося к выпуску IFC5. Основная причина такого построения проекта buildingSMART, начинающегося с проекта трассы, была основана на идее, что трассы необходимы для всех объектов линейной инфраструктуры, и они должны выступать в качестве основы для дальнейших проектов, таких как IFC Bridge и IFC Road [48].

Хотя в первой версии IFC Bridge уже реализовано простое представление трассы, возможности отображения, включенные в требования нового проекта, завершились созданием совершенно новой модели. Кроме того, новая модель согласования способна отображать два наиболее широко распространенных формата данных обмена при проектировании инфраструктуры, а именно LandXML и OKSTRA [48]. Кроме того, buildingSMART сотрудничал с рабочей группой OGC по земельным ресурсам и инфраструктуре для реализации прямого сопоставления моделей на основе IFC Alignment с развивающимся стандартом InfraGML.

С технической точки зрения, IFC Alignment предоставляет два разных, но дополняющих друг друга метода описания совмещений [48]. С одной стороны, информация о выравнивании может быть напрямую представлена одной или несколькими трехмерными кривыми в пространстве. Эта методика позволяет напрямую визуализировать выравнивание без каких-либо дополнительных усилий. С другой стороны, могут быть определены два 2D-представления горизонтального и вертикального выравнивания, обеспечивающие систему CAD исходной информацией, введенной инженером. Соответственно, если предоставляется только этот второй метод, системе CAD потребуется обработать информацию, чтобы отобразить окончательное трехмерное выравнивание.

На рисунке 18 показаны модули и уровни, которые были расширены для соответствия новым разработанным объектам модели IFC Alignment. Определение схемы выравнивания содержится только в двух модулях, то есть в ресурсе геометрических ограничений и ресурсе геометрии. Модуль Product Extension также был изменен, чтобы можно было определять размещение на основе объекта выравнивания.

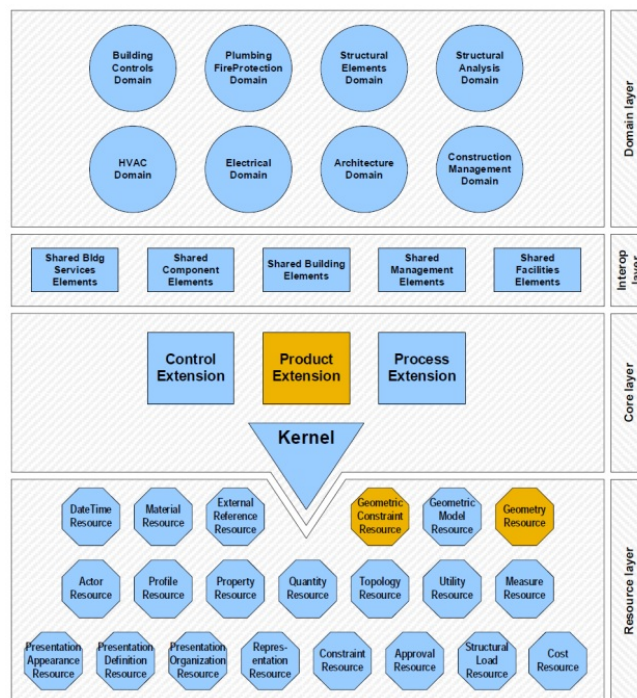


Рис. 18. Расширенная архитектура IFC для согласования (Источник - документация IFC)

### IFC Road

Первые международные усилия по распространению стандарта IFC на проектирование дорог и земляных работ были предприняты Институтом KICT8 в Корее. В 2012 году стартовал проект IFC Road с основной целью расширения схемы IFC4 с точки зрения представления формы объекта и определения объектов и основных атрибутов компонентов дороги [48]. Параллельная разработка проекта выравнивания IFC убедила исследователей IFC Road не разрабатывать собственный подход к выравниванию и решила объединить оба проекта в конце стадии исследования.

После выпуска первой версии IFC Alignment, buildingSMART начал несколько проектов, основанных на новом определении выравнивания. Используя преимущества предыдущих разработок, проведенных KICT в области проектирования дорог, buildingSMART создал новый проект IFC Roads с целью координации и согласования существующих расширений и заинтересованности, проявленной другими подразделениями и организациями, такими как OGC [48].

Основной целью проекта IFC Roads является расширение стандарта IFC для охвата конструкций дорог и земляных работ, поэтому этот проект претендует на роль общего слоя, на который могут полагаться другие проекты, например IFC Bridge, IFC tunnel и IFC Rail [48]. В дополнение к определению земляных работ, продолжение дороги делится на четыре дополнительных части, а именно: пространственную структуру, дорожное сооружение, дренаж и вспомогательные сооружения. На рисунке 19 изображена предлагаемая архитектура. Корейская модель данных была официально принята как buildingSMART SPEC, что означает, что она задокументирована и опубликована на веб-сайте buildingSMART, но не имеет характера официального



стандарта (<https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/standards-library/>). Вместе с тем он приблизился к этому статусу после публикации IFC Road как кандидата в стандарты [9].

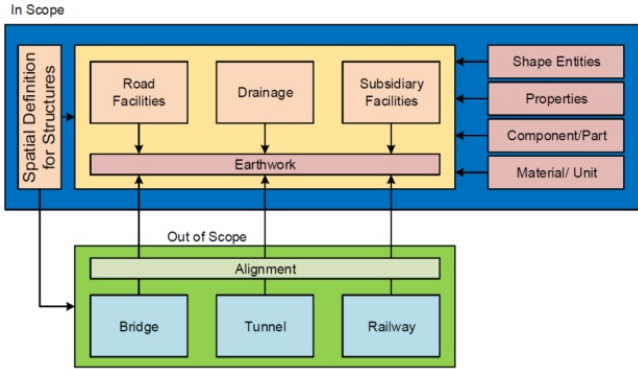


Рис. 19. Предлагаемая архитектура IFC Road [48]

**IFC Rail**

Подобно работе, проводимой в Корее институтом KICT по развитию расширения IFC для дорог и земляных работ, в Китае эта задача была предпринята альянсом CRBIM9 для разработки расширения IFC для железных дорог. Исследовательский проект начался в 2014 году с тремя основными целями: (1) предоставить руководящие принципы и правила реализации для создания и хранения данных BIM в строительстве железных дорог, (2) облегчить обмен информацией между платформами и приложениями для железнодорожной инфраструктуры и (3) предоставить активы открытого формата BIM владельцам и регулирующим органам в отрасли [48]. Результаты этого исследования могут способствовать разработке первой версии IFC Rail.

Кроме того, китайский стандарт IFC-Rail был принят компанией buildingSMART как SPEC, что опять же не имеет пока характеристик обязательного международного стандарта (<https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/standards-library/>). Вместе с тем он приблизился к этому статусу после публикации IFC-Rail как кандидата в стандарты [9].

Цель CRBIM - не только определить основные элементы, из которых состоит рельсовый путь, но и включить и переопределить все элементы, через которые проходит рельсовый путь. Таким образом, были разработаны новые схемы путей, воздушных линий и станций, а существующие схемы трасс, мостов и туннелей были обновлены. На рисунке 20 показана предлагаемая пространственная интеграция для различных элементов, содержащихся в проекте инфраструктуры IFC Rail и ставшая иллюстрацией в кандидате

стандарты (<https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/standards-library/>).

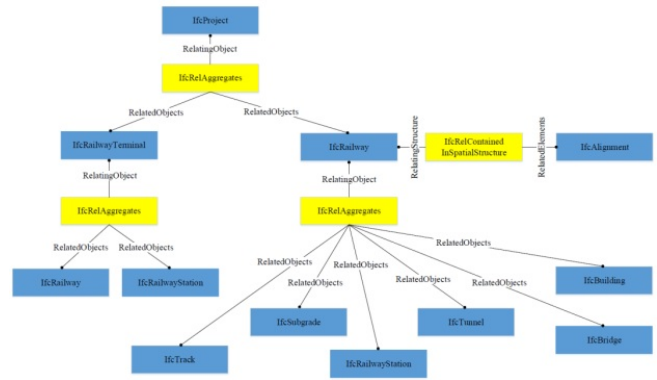


Рис. 20. Пространственная композиция, предложенная CRBIM на железной дороге для IFC. (Источник- CRBIM)

Альянс CRBIM предпринял две новые разработки для расширения IFC для железных дорог. Во-первых, унаследованный проект IFC Alignment был расширен за счет нового определения горизонтального выравнивания, основанного на ценности цепочки. Хотя значение цепочки не требуется для определения кривой пространства выравнивания, цепочка широко используется в качестве индикатора локального позиционирования. Во-вторых, расширение IFC Railways предлагает разделение объектов железнодорожной инфраструктуры на более мелкие элементы, аналогично пространственному разделению элемента здания на здания и этажи зданий. На рисунках 21 и 22 показаны два примера этого подхода к разделению, применяемого к мосту и объекту инфраструктуры туннеля.

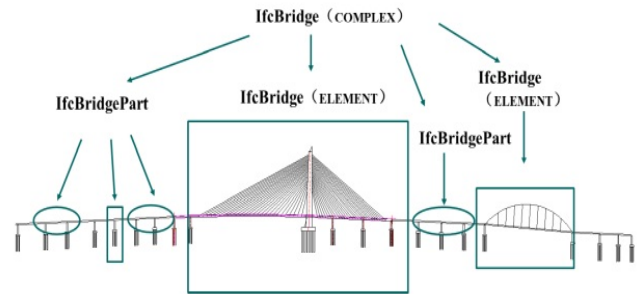


Рис. 21. Подразделение объекта мостовой инфраструктуры, предложенное расширением IFC Rail (Источник - CRBIM).

В отличие от подхода, применяемого другими группами инфраструктуры, где предлагаемое расширение концентрируется на определении новых семантических сущностей, альянс CRBIM предлагает комбинацию статических и динамических определений [48]. Для статического определения общих модулей инфраструктуры IFC предложение CRBIM опирается на рекомендации buildingSMART по объектно-ориентированному наследованию и определению иерархической сущности. В противном случае, элементы, которые считаются специфическими для страны или зоны влияния, определяются в соответствии с динамическим определением.

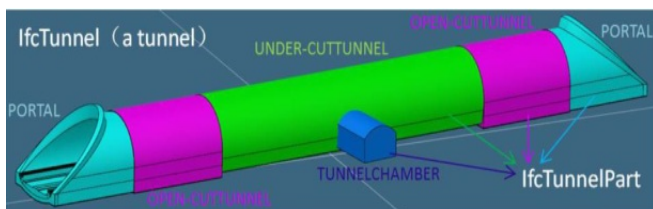


Рис. 22. Подразделение объекта инфраструктуры туннеля, предложенное расширением IFC Rail. (Источник – CRBIM)

В завершение обзора состояния регламентов buildingSMART мы хотели бы привлечь внимание читателя на новые документы [51, 52], относящиеся к рассматриваемой теме.

Стоит обратить внимание на то, что в августе 2020 года опубликован еще один кандидат в стандарты на сайте buildingSMART IFC4-precast-Published-Candidate-Standard-1 [51]. Он посвящен компонентам строительства, изготовленным заводским способом из бетона. В нем сказано, что с точки зрения промышленности сборного железобетона, открытое, перспективное, эффективное и межотраслевое решение имеет смысл, в котором участвуют производители ERP, CAD, MES и производители оборудования, а также производители встроенных компонентов.

Проект направлен на создание стандартизированного на международном уровне интерфейса, поддерживаемого отраслью, на основе существующих интерфейсов, уже установленных в процессе заводского изготовления, таких как AIA, Unitechnik версий 1.0–6.1, UXML, PXML и BVBS. Поскольку сборные изделия становятся все более сложными, растет спрос на более функциональный интерфейс обмена моделями [51].

В работах [5, 6] приводились данные о том, какие невероятные экономические эффекты можно получить на строительстве линейных объектов и, в том числе, за счет их повторяемости типичной для линейного строительства, а также при увеличении их заводского изготовления. Собственно этой теме и посвящён этот кандидат в стандарты.

В отчете [52], который также относится к транспортным инфраструктурам, исследуется текущее состояние классификации для среды построенной инфраструктуры, признавая при этом, что существующие инструменты и системы должны учитывать быстрый переход к полному цифровому описанию активов и их функций. Он исследует критерии для переходных и будущих систем классификации. Кроме того, в отчете рассматриваются полностью смоделированные на основе информации результаты и связанная информация, которые создают мир «интеллектуальной инфраструктуры».

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проекты подземного строительства печально известны превышением сроков и затрат, часто в результате неточной интерпретации информации и, следовательно, неправильных прогнозов. В работе [53] утверждают, что качество прогнозов может быть значительно улучшено путем оцифровки процессов проектирования и строительства, и что с прозрачной информацией о состоянии проекта и его граничных условиях можно

легко идентифицировать и разрешить или предотвратить конфликты.

Выявленные представления о проектировании BIM-модели с последующим построением легальной цифровой модели вместо 2D-чертежей в основном положительные. Хотя такой способ работы демонстрирует инновационные преимущества и возможности, возникают новые проблемы и риски. Это влечет за собой юридические риски, технические риски и риски управления. Появляются новые типы ошибок, которые возникают при более детальном проектировании [34].

В работе [53] приводится интересное высказывание «То, что вы видите, это все, что есть» - WYSIATI - это принцип, введенный психологом Дэниелом Канеманом, который описывает предвзятое мышление человеческого разума, которое очень быстро делает окончательные выводы, но на основе ограниченной и частично ложной информации только потому, что они доступны, Это приводит к чрезмерному представлению незначительных деталей, которые легко распознать по более важным фактам, которые труднее воспринимать. Все это конечно справедливо для туннелей, которые строятся в абсолютно чуждой для чувств человека среде.

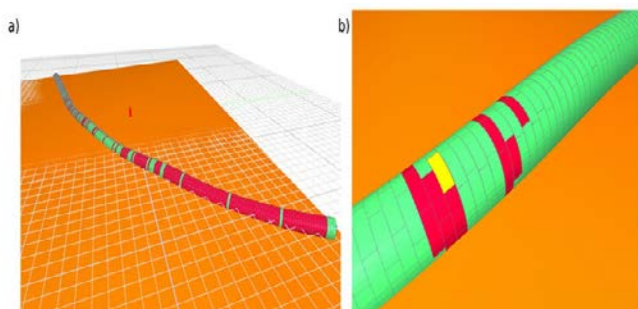


Рис. 23. BIM-представление сегментной облицовки, встроенной в цифровую наземную модель с выделенными силами тяги ТБМ [53]

Используя этот принцип, качество решений может быть значительно улучшено за счет облегчения восприятия важной информации и представления лицам, принимающим решения, более полной картины проекта в легко интерпретируемой и прозрачной форме. Благодаря уменьшению ложных предубеждений и учету предыдущего опыта, научных фактов, статистической значимости и интеграции больших объемов данных, компьютерная поддержка принятия решений помогает находить более эффективные, экономически обоснованные и обоснованные решения.

Это требует, чтобы ключевые компоненты проекта туннелирования ТБМ были понятны компьютерным системам, а проект существовал в цифровой форме в отношении [53]:

- Легальной модели, являющейся цифровым образом окружающей среды туннеля,
- Структуры туннеля, включая все основные компоненты,
- ТБМ, которая являясь важным инструментом для строительства туннеля.

Все это позволяет показать, как на практике будет работать робот – ТБМ в самом ближайшем будущем,

основываясь на полной прозрачной картине и работая как цифровой близнец, аналогичный описанным в статье [56].

Чтобы получить полную прозрачную картину, эта информация должна быть представлена в общей структуре, например, в BIM (построение информационных моделей), которая делает данные легкодоступными и указывает на актуальность. BIM может использоваться на ранней стадии туннельного проекта и уже использоваться для получения преимуществ на этапах проектирования и строительства. Ключевые компоненты этих моделей могут быть связаны друг с другом посредством единой системы координат местоположения и времени. Целью цифровой легальной модели является предоставление информации от геотехнических исследований и геологической экспертизы всем заинтересованным сторонам проекта в машиночитаемой форме [53].

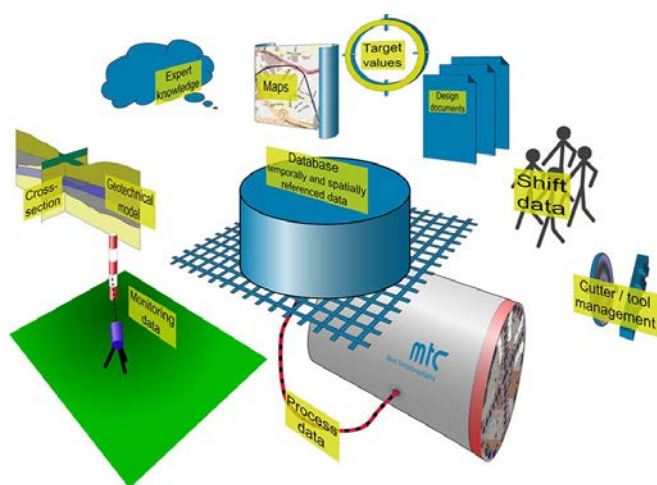


Рис. 24. Источники данных для интегрированной системы управления информацией PROCON [53]

Вдоль своего выравнивания объем туннеля пересекается с цифровой геотехнической моделью, чтобы создать цифровую трехмерную модель туннеля (рисунок 23), с областями схожих геотехнических свойств из однородных участков в качестве основы. Кольца сегментов накладки представлены в модели для включения данных от отслеживания сегмента и управления качеством.

Данные в реальном времени от сотен датчиков, которые контролируют каждый компонент операций ТВМ, необходимы для понимания взаимодействия между ТВМ, землей и структурой туннеля. Однако объем этих данных требует фильтрации по релевантности и суммированию информации для лиц, принимающих решения. Здесь программное обеспечение управления процессом, такое как PROCON, играет важную роль [53] для обеспечения графического представления данных проекта в интерактивных диаграммах в общей схеме работы с данными (рисунок 24).

Мониторинг поверхности земли и прилегающих сооружений является еще одним источником информации, который требует внимания. Измерения часто регистрируются и обрабатываются в цифровом виде и обычно отображаются в средах ГИС, где

пользователи могут легко найти и оценить их. Маркеры иногда визуализируются в 3D.

Как и данные ТВМ, объем данных измерений огромен. Следовательно, полезная информация может быть получена только из данных мониторинга с надлежащей фильтрацией и системой сигнализации на основе пороговых значений.

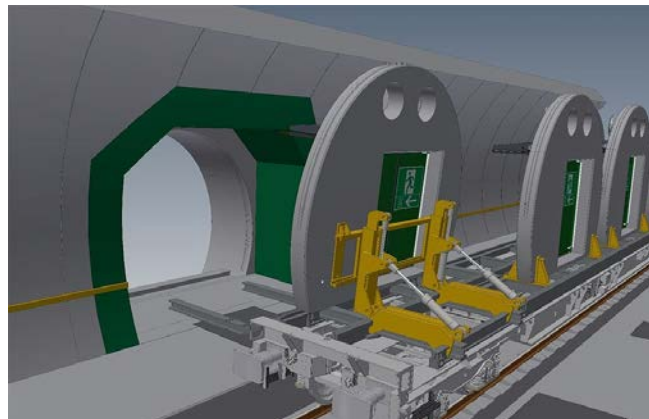


Рис. 25. Использование цифровых двойников на базе BIM для автоматической установки туннельных ворот – [57].

Подрывные технологии, как правило, имеют очень существенное развитие [56,57]. Так легитимная цифровая модель BIM, превратившаяся в цифровой двойник, позволяет, например, планировать установку туннельных ворот автоматами – роботами, избавляя работника – человека от операций в опасной и зачастую вредной среде.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] A. Athanasopoulou, A. Bezuijen, W. Bogusz, et.al. Standardisation needs for the design of underground structures EU JRC 2019 <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/standardisation-needs-design-underground-structures>
- [2] Francesca Maria Ugliotti BIM and Facility Management for smart data management and visualization Ph.D. Graduate School of Politecnico di Torino (ScuDo). 2017 <http://repository.unioneitalianadisegno.it/handle/123456789/7>
- [3] Климов А. А. и др. BIM и инженерные формализованные онтологии на цифровой железной дороге Европы в объединении EULYNX-экономика данных //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 8.
- [4] Kupriyanovsky V. et al. On the effects of formalized ontologies in the data economy-the EU experience //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 8. – С. 66-78.
- [5] Куприяновский В. П. и др. BIM НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ МИРА-РАЗВИТИЕ, ПРИМЕРЫ, СТАНДАРТЫ //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 5.
- [6] Pokusaev O. et al. BIM, Ontology and Asset Management Technologies on European Highways //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 6. – С. 108-135.
- [7] Куприяновский В.П., Климов А.А., Покусаев О.Н. Онтологии и проекты электронных закупок Европы // Социальные новации и социальные науки. – Москва: ИНИОН РАН, 2020. – № 1. – С. 97–106
- [8] Kupriyanovsky V. et al. Hyperloop-current status and future challenges //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 7. – С. 129-144.
- [9] Kupriyanovsky V. et al. BIM on the way to IFC5-alignment and development of IFC semantics and ontologies with UML and OWL for road and rail structures, bridges, tunnels, ports, and waterways //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 8. – С. 69-78.

- [10] И.В. Понкин, В.П. Куприяновский, С.Л. Морева, Д.И. Понкин Подрывные технологические инновации: понятие, значение и онтология, *International Journal of Open Information Technologies* ISSN: 2307-8162 vol. 8, no.8, 2020
- [11] В.А.Гарбер, Н.Н.Симонов, А.А.Кашко, Д.В.Панфилов Информационное-моделирование-в-тоннелестроении, *Подземные-горизонты-№20* 2019 <http://www.techinformpress.ru/index.php/21-iz-novogo-nomera-iz-novogo-nomera/articles/802-informatsionnoe-modelirovanie-v-tonnellestroenii>
- [12] PONKIN, Igor Vladislavovich; KUPRIYANOVSKY, Vasily Pavlovich; PONKIN, Dmitry Igorevich. Fintech, Regtech и регуляторные песочницы: понятие, цифровая онтология, перспективы. *Международный научный журнал «Современные информационные технологии и ИТ-образование»*, v. 16, n. 1, May 2020. <http://sitito.cs.msu.ru/index.php/SITITO/article/view/632>.
- [13] Mohammad Reza Zaker Hossein BIM implementation in architectural practices: towards advanced collaborative approaches based on digital technologie ,Barcelona School of Architecture ,Doctorate Program in ARCHITECTURAL TECHNOLOGY, BUILDING CONSTRUCTION AND URBANISM Research team: LITA (Laboratory of Innovation and Technology in Architecture), DOCTORAL THESIS ,Universitat Politècnica de Catalunya 2020 <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/668050/TMRZH1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [14] PAS 128:2014 Specification for underground utility detection, verification and location
- [15] PAS 256:2017 Buried assets. Capturing, recording, maintaining and sharing of location information and data. Code of practice
- [16] PAS 8810:2016 Tunnel design. Design of concrete segmental tunnel linings. Code of practice
- [17] PAS 8812:2016 Temporary works - Application of European Standards in design - Guide
- [18] May 24, 2018 UK standard PAS128 for underground utility locating to be revised <https://geospatial.blogs.com/geospatial/2018/05/uk-standard-pas128-for-underground-utility-locating-to-be-revised.html>
- [19] New code of practice for recording data on underground utilities <https://www.bsigroup.com/en-GB/about-bsi/media-centre/press-releases/2017/september/New-code-of-practice-for-recording-data-on-underground-utilities/>
- [20] Future of Planning - Project Iceberg <https://futurecities.catapult.org.uk/project/future-planning-project-iceberg/>
- [21] National Underground Asset Register Project update , © Crown copyright 2020, June 2020, [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/897060/Project\\_Orange\\_V3\\_01.07.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/897060/Project_Orange_V3_01.07.pdf)
- [22] HRT-16-019 Feasibility of Mapping and Marking Underground Utilities by State Transportation Departments U.S. Department of Federal Transportation Highway Administration б PUBLICATION NO. FHWA-HRT-16-019, JULY 2018 <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/16019/index.cfm>
- [23] Hui Wang, Xiangrong Wang, Robert Liang Study of AI Based Methods for Characterization of Geotechnical Site Investigation Data, FHWA/OH-2020-3 ,Prepared in cooperation with the Ohio Department of Transportation (ODOT) and the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2020 <https://www.geoinstitute.org/sites/default/files/2020-04/Study%20of%20AI%20based%20methods%20for%20characterization%20of%20geotechnical%20site%20investigation%20data%20-%20Wang%202020.pdf>
- [24] The UK's geospatial strategy 2020 to 2025 © Crown copyright 2020 Published 16 June 2020, Last updated 14 July 2020 <https://www.gov.uk/government/publications/unlocking-the-power-of-locationthe-uks-geospatial-strategy>
- [25] Gary Morin Geotechnical BIM: Applying BIM Principles to the Subsurface <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Geotechnical-BIM-Appling-BIM-Principles-Subsurface-2019>
- [26] ЦИФРОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ ПОЛУЧИЛА ПЕРВЫЕ СТАНДАРТЫ [https://minpromorg.gov.ru/press-centre/news/#!cifrovaya\\_promyshlennost\\_poluchila\\_pervye\\_standarty](https://minpromorg.gov.ru/press-centre/news/#!cifrovaya_promyshlennost_poluchila_pervye_standarty)
- [27] BTS Hyperloop Challenge: Tunnels for Hyperloop ,BTS Print Date: 29-08-19 <https://www.britishtunnelling.org.uk/?sitecontentid=7AF4F502-E39F-4193-9328-21AFA97D51B5>
- [28] Full Business Case High Speed 2 Phase One Moving Britain Ahead Department for Transport © Crown copyright 2020 April 2020 [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/879445/full-business-case-hs2-phase-one.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/879445/full-business-case-hs2-phase-one.pdf)
- [29] HIGH SPEED TWO PHASE 2a INFORMATION PAPER F2 Phase\_2a\_Tunnels\_v1.1 Version 1.1 ,Last updated 15 February 2019 [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/779305/F2\\_Phase\\_2a\\_Tunnels\\_v1.1.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/779305/F2_Phase_2a_Tunnels_v1.1.pdf)
- [30] High Speed Rail in the Chilterns Part 1: General Long Tunnel Requirements June 2015 5\_C222-ATK-TN-REP-020-000013\_P02 [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/436540/5\\_C222-ATK-TN-REP-020-000013\\_P02.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/436540/5_C222-ATK-TN-REP-020-000013_P02.pdf)
- [31] HS2 station shortlist as work sites mobilise 25 Jun 2020 <https://www.tunneltalk.com/UK-24Jun2020-HS2-shortlist-for-Birmingham-Curzon-Street-station.php>
- [32] HS2 Supply Chain BIM Upskilling Study , Mace Limited 2013 [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/400620/HS2\\_Supply\\_Chain\\_BIM\\_Upskiiling\\_Study\\_June\\_2013\\_.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/400620/HS2_Supply_Chain_BIM_Upskiiling_Study_June_2013_.pdf)
- [33] Аленьков В. В. и др. Использование структурированной информации BIM для охраны здоровья и безопасности работающих в строительстве //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 5.
- [34] Sebastian Orenäs Nissas, Nangi Rahimi , Digitalized Construction Project - To Build after a Legally Binding BIM-model TECHNOLOGY ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY DEPARTMENT OF REAL ESTATE AND CONSTRUCTION MANAGEMENT RTN STOCKHOLM, SWEDEN 2020 <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1458301&dsid=5551>
- [35] Natallia Azaronak, Building 3D models from geotechnical data, Master of Science Thesis in Geoinformatics, TRITA-GIT EX 15-010, School of Architecture and the Built Environment,Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, June 2015 <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:837614/FULLTEXT01.pdf>
- [36] КЛИМОВ, А.А., ПОКУСАЕВ О.Н., КУПРИЯНОВСКИЙ В.П., НАМИОТ Д.Е. АРХИТЕКТУРА АВТОНОМНЫХ (БЕСПИЛОТНЫХ) АВТОМОБИЛЕЙ И ИНФРАСТРУКТУРА ДЛЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ. *Международный научный журнал «Современные информационные технологии и ИТ-образование»*, [S.1.], v. 14, n. 3, Sep. 2018.
- [37] ПОКУСАЕВ О.Н., МИШАРИН А.С., КУПРИЯНОВСКИЙ В.П., КЛИМОВ А.А. МИРОВОЙ РЫНОК АВТОНОМНЫХ (БЕСПИЛОТНЫХ) АВТОМОБИЛЕЙ. *Международный научный журнал «Современные информационные технологии и ИТ-образование»*, v. 14, n. 3, Sep. 2018.
- [38] Shaklein A. et al. The motives for the use of autonomous (driverless) cars in the EC and the USA //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7. – №. 1. – С. 104-114.
- [39] UK invests in a digital railway signaling system that will allow trains to 'talk' to tracks PUBLISHED MON, JUN 22 2020 9:20 AM EDT <https://www.cnn.com/2020/06/22/uk-invests-in-digital-system-will-allow-trains-to-talk-to-tracks.html>
- [40] Thousands of hours in delays to be saved as UK's first mainline digital railway introduced 22 June 2020 <https://www.gov.uk/government/news/thousands-of-hours-in-delays-to-be-saved-as-uks-first-mainline-digital-railway-introduced>
- [41] Pokusaev O. et al. On System of Systems ontologies in the national standards for UK digital railways //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 11. – С. 85-96.
- [42] Соколов И. А. и др. Возможности развития цифровой железной дороги, как базы мультимодальной транспортной системы умных городов в условиях цифровой экономики //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 12.
- [43] Куприяновский В.П., Аленьков 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. Стр. 129- 166
- [44] Kupriyanovsky V. et al. Bandwidth and economy of the digital railway in the transformation of signaling and train control //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 3. – С. 117-132.

- [45] Kupriyanovsky V. P. et al. Economics of innovations for digital railways. Experience in the UK //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 3. – С. 79-99.
- [46] vorgelegt von B.Eng. Robert Lensing „BIM and construction process data in mechanized tunnel construction“ Milestone control for tunnel construction sites using automatically created process data in comparison with 4D BIM „Master Thesis im Rahmen des Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“ (UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z\_GIS) der Paris Lodron-Universität Salzburg 2017 <http://unigis.sbg.ac.at/files/Masterthesen/Full/103255.pdf>
- [47] Mahsa Ghaznavi Developing an Information Modeling Framework for Tunnel Construction Projects , A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Construction Engineering & Management Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta 2013 <https://era.library.ualberta.ca/items/7c81bff6-500a-4e2a-9fa1-7d5d781023dc>
- [48] Javier Ramos Jubierre „Consistency preservation methods for multi scale design of subway infrastructure facilities, Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigten Dissertation. 2017 <https://www.semanticscholar.org/paper/Consistency-preservation-methods-for-multi-scale-of-Jubierre-Javier/6d4ea447604a96076b10c9ff076aa6b0616f430c>
- [49] A multi-scale product model for shield tunnels based on the Industry Foundation Classes Javier Ramos Jubierre André Borrmann Technische Universität München Version: 5.09.2014 [https://publications.cms.bgu.tum.de/reports/2014\\_Jubierre\\_IfcTunnel.pdf](https://publications.cms.bgu.tum.de/reports/2014_Jubierre_IfcTunnel.pdf)
- [50] Abdullah Alsahly Advanced computational techniques for mechanized tunneling along arbitrary alignments and tunnel face stability analysis Ruhr University Bochum 2018 <https://hss-opus.ub.ruhr-unibochum.de/opus4/frontdoor/index/index/start/3/rows/10/sortfield/score/sortorder/desc/searchtype/simple/query/bim/docId/6082>
- [51] IFC4-precaster-Candidate-Standard-1 , <https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/08/IFC4-precaster-Candidate-Standard-1.pdf>
- [52] Phil Jackson Nordic Study of Classification Systems for Infrastructure &Transportation ,Version 1.0 July 2020, bSI Document Number: IR-2020-1022-TR , <https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/08/Nordic-Study-of-Classification-Systems-for-Infrastructure-Transportation-v1.0-1.pdf>
- [53] Ulrich Maidl, Marc Comulada, Janosch Stascheit and Felix Hegemann, Maidl Tunnelconsultants , TunnelTECH Integrating TBM management data with BIM ,17 Jan 2019, <https://www.tunneltalk.com/TunnelTECH-Jan2019-Digital-data-management-of-BIM-applications.php>
- [54] Crossrail 2 [https://en.wikipedia.org/wiki/Crossrail\\_2](https://en.wikipedia.org/wiki/Crossrail_2)
- [55] BADGER D1.1. Use Case analysis and user requirements, BADGER, March 2017 Gora, P., & Rüb, I. (2016). Traffic models for self-driving connected cars. Transportation Research Procedia, 14(14), 2207-2216.
- [56] Куприяновский В. П. и др. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ НА БАЗЕ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ BIM, СВЯЗАННЫЕ ОНТОЛОГИЯМИ, 5G, IOT И СМЕШАННОЙ РЕАЛЬНОСТЬЮ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ПРОЕКТАХ И IFRABIM //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 3.
- [57] Roland Herr, TunnelTalk „Tunnel 4.0 - digital twin is the future ,The use of digital tools during the entire process of tunnel, 04 Jun 2020 <https://www.tunneltalk.com/TunnelTECH-June2020-Digitization-for-the-benefit-of-infrastructure-planning-design-construction-and-operation.php>

# BIM Technologies for Tunnels Used in Subways, Railways, Highways, and Hyperloop - IFC-Driven Real-Time Systems and Disruptive Innovation

Vasily Kupriyanovsky, Yuri Voropaev, Oleg Pokusaev, Alexander Klimov, Andrey Dobrynin, Dmitry Gapanovich

**Abstract—** The article deals with the use of BIM technologies for tunnels. Tunnel and subway construction is one of the most challenging applications for special equipment in civil engineering. An underground construction site requires the use of machines that can work in very specific conditions. This is a narrow and confined space, large volumes of material at the construction site, dust, and other factors that make work difficult. The safety levels in such construction must also be very high. The cost of mistakes and inconsistencies in the tunnel business is also extremely high, as is the cost of success, which makes possible what was previously unthinkable. The use of BIM as a hub for collecting and leveraging innovations that reduce construction costs and time, and improve working conditions in tunnels and subways, in fact, began simultaneously with the emergence of modern BIM. Therefore, based on the growing needs for knowledge, expressed in formalized semantics and ontologies recognized in the digital economy, in complex construction projects, a knowledge management system is needed, based on the BIM ontological model, located in a real-time data center.

**Key words—** BIM, Railways, Innovations.

## REFERENCES

- [1] A. Athanasopoulou, A. Bezuijen, W. Bogusz, et.al. Standardisation needs for the design of underground structures EU JRC 2019 <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/standardisation-needs-design-underground-structures>
- [2] Francesca Maria Ugliotti BIM and Facility Management for smart data management and visualization Ph.D. Graduate School of Politecnico di Torino (ScuDo). 2017 <http://repository.unioneitalianadisegno.it/handle/123456789/7>
- [3] Klimov A. A. i dr. BIM i inzhenernye formalizovannye ontologii na cifrovoj zheleznoj doroge Evropy v ob"edinenii EULYNX-jekonomika dannyh //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 8.
- [4] Kupriyanovsky V. et al. On the effects of formalized ontologies in the data economy-the EU experience //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 8. – S. 66-78.
- [5] Kupriyanovskij V. P. i dr. BIM NA ZHELEZNYH DOROGAH MIRA-RAZVITIE, PRIMERY, STANDARTY //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 5.
- [6] Pokusaev O. et al. BIM, Ontology and Asset Management Technologies on European Highways //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 6. – S. 108-135.
- [7] Kupriyanovskij V.P., Klimov A.A., Pokusaev O.N. Ontologii i proekty jelektronnyh zakupok Evropy // Social'nye novacii i social'nye nauki. – Moskva: INION RAN, 2020. – # 1. – S. 97–106
- [8] Kupriyanovsky V. et al. Hyperloop-current status and future challenges //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 7. – S. 129-144.
- [9] Kupriyanovsky V. et al. BIM on the way to IFC5-alignment and development of IFC semantics and ontologies with UML and OWL for road and rail structures, bridges, tunnels, ports, and waterways //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 8. – S. 69-78.
- [10] I.V. Ponkin, V.P. Kupriyanovskij, S.L. Moreva, D.I. Ponkin Podryvnye tehnologicheskie innovacii: ponjatie, znachenie i ontologija, International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 8, no.8, 2020
- [11] V.A.Garber, N.N.Simonov, A.A.,Kashko, D.V.Panfilov Informacionnoe-modelirovanie-v-tonnelestroenii, Podzemnye-gorizonty-#20 2019 <http://www.techinform-press.ru/index.php/21-iz-novogo-nomera-iz-novogo-nomera/articles/802-informacionnoe-modelirovanie-v-tonnelestroenii>
- [12] PONKIN, Igor Vladislavovich; KUPIRYANOVSKY, Vasily Pavlovich; PONKIN, Dmitry Igorevich. Fintech, Regtech i reguljatornye pesochnicy: ponjatie, cifrovaja ontologija, perspektivy. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie», v. 16, n. 1, May 2020. <http://sitiito.cs.msu.ru/index.php/SITITO/article/view/632>.
- [13] Mohammad Reza Zaker Hossein BIM implementation in architectural practices: towards advanced collaborative approaches based on digital technologie ,Barcelona School of Architecture ,Doctorate Program in ARCHITECTURAL TECHNOLOGY, BUILDING CONSTRUCTION AND URBANISM Research team: LITA (Laboratory of Innovation and Technology in Architecture), DOCTORAL THESIS ,Universitat Politècnica de Catalunya 2020 <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/668050/TMRZH1d e1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [14] PAS 128:2014 Specification for underground utility detection, verification and location
- [15] PAS 256:2017 Buried assets. Capturing, recording, maintaining and sharing of location information and data. Code of practice
- [16] PAS 8810:2016 Tunnel design. Design of concrete segmental tunnel linings. Code of practice
- [17] PAS 8812:2016 Temporary works - Application of European Standards in design - Guide
- [18] May 24, 2018 UK standard PAS128 for underground utility locating to be revised <https://geospatial.blogs.com/geospatial/2018/05/uk-standard-pas128-for-underground-utility-locating-to-be-revised.html>
- [19] New code of practice for recording data on underground utilities <https://www.bsigroup.com/en-GB/about-bsi/media-centre/press-releases/2017/september/New-code-of-practice-for-recording-data-on-underground-utilities/>
- [20] Future of Planning - Project Iceberg <https://futurecities.catapult.org.uk/project/future-planning-project-iceberg/>
- [21] National Underground Asset Register Project update , © Crown copyright 2020, June 2020, [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/897060/Project\\_Orange\\_V3\\_01.07.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/897060/Project_Orange_V3_01.07.pdf)
- [22] HRT-16-019\_Feasibility of Mapping and Marking Underground Utilities by State Transportation Departments U.S. Department of Federal Transportation Highway Administration b PUBLICATION

- NO. FHWA-HRT-16-019, JULY 2018  
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/16019/index.cfm>
- [23] Hui Wang, Xiangrong Wang, Robert Liang Study of AI Based Methods for Characterization of Geotechnical Site Investigation Data, FHWA/OH-2020-3 ,Prepared in cooperation with the Ohio Department of Transportation (ODOT) and the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2020  
<https://www.geoinstitute.org/sites/default/files/2020-04/Study%20of%20AI%20based%20methods%20for%20characterization%20of%20geotechnical%20site%20investigation%20data%20-%20Wang%202020.pdf>
- [24] The UK's geospatial strategy 2020 to 2025 © Crown copyright 2020 Published 16 June 2020, Last updated 14 July 2020  
<https://www.gov.uk/government/publications/unlocking-the-power-of-location-the-uks-geospatial-strategy>
- [25] Gary Morin Geotechnical BIM: Applying BIM Principles to the Subsurface <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Geotechnical-BIM-Appling-BIM-Principles-Subsurface-2019>
- [26] CIFROVAJa PROMYShLENNOST" POLUChILA PERVYE STANDARTY [https://minpromtorg.gov.ru/press-centre/news/#lcifrovaya\\_promyshlennost\\_poluchila\\_pervye\\_standarty](https://minpromtorg.gov.ru/press-centre/news/#lcifrovaya_promyshlennost_poluchila_pervye_standarty)
- [27] BTS Hyperloop Challenge: Tunnels for Hyperloop ,BTS Print Date: 29-08-19  
<https://www.britishtunnelling.org.uk/?sitecontentid=7AF4F502-E39F-4193-9328-21AFA97D51B5>
- [28] Full Business Case High Speed 2 Phase One Moving Britain Ahead Department for Transport © Crown copyright 2020 April 2020  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/879445/full-business-case-hs2-phase-one.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/879445/full-business-case-hs2-phase-one.pdf)
- [29] HIGH SPEED TWO PHASE 2a INFORMATION PAPER F2\_Phase\_2a\_Tunnels\_v1.1 Version 1.1 ,Last updated 15 February 2019  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/779305/F2\\_Phase\\_2a\\_Tunnels\\_v1.1.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/779305/F2_Phase_2a_Tunnels_v1.1.pdf)
- [30] High Speed Rail in the Chilterns Part 1: General Long Tunnel Requirements June 2015 5.\_C222-ATK-TN-REP-020-000013\_P02  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/436540/5.\\_C222-ATK-TN-REP-020-000013\\_P02.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/436540/5._C222-ATK-TN-REP-020-000013_P02.pdf)
- [31] HS2 station shortlist as work sites mobilise 25 Jun 2020  
<https://www.tunneltalk.com/UK-24Jun2020-HS2-shortlist-for-Birmingham-Curzon-Street-station.php>
- [32] HS2 Supply Chain BIM Upskilling Study , Mace Limited 2013  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/400620/HS2\\_Supply\\_Chain\\_BIM\\_Upskilling\\_Study\\_June\\_2013\\_.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/400620/HS2_Supply_Chain_BIM_Upskilling_Study_June_2013_.pdf)
- [33] Alen'kov V. V. i dr. Ispol'zovanie strukturirovannoj informacii BIM dlja ohrany zdorov'ja i bezopasnosti rabotajushhh v stroitel'stve //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 5.
- [34] Sebastian Orenäs Nissas, Nangi Rahimi , Digitalized Construction Project - To Build after a Legally Binding BIM-model TECHNOLOGY ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY DEPARTMENT OF REAL ESTATE AND CONSTRUCTION MANAGEMENT RTN STOCKHOLM, SWEDEN 2020  
<http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1458301&dsid=5551>
- [35] Natallia Azaronak, Building 3D models from geotechnical data, Master of Science Thesis in Geoinformatics, TRITA-GIT EX 15-010, School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, June 2015  
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:837614/FULLTEXT01.pdf>
- [36] KLIMOV, A.A., POKUSAEV O.N., KUPRIJANOVSKIJ V.P., NAMIOT D.E. ARHITEKTURA AVTONOMNYH (BESPILOTNYH) AVTOMOBILEJ I INFRASTRUKTURA DLJA IH JeKSPLUATACII. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie», [S.l.], v. 14, n. 3, Sep. 2018.
- [37] POKUSAEV O.N., MISHARIN A.S., KUPRIJANOVSKIJ V.P., KLIMOV A.A., MIROVOJ RYNOK AVTONOMNYH (BESPILOTNYH) AVTOMOBILEJ. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie», v. 14, n. 3, Sep. 2018.
- [38] Shaklein A. et al. The motives for the use of autonomous (driverless) cars in the EC and the USA //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – T. 7. – #. 1. – S. 104-114.
- [39] UK invests in a digital railway signaling system that will allow trains to 'talk' to tracks PUBLISHED MON, JUN 22 2020 9:20 AM EDT  
<https://www.cnn.com/2020/06/22/uk-invests-in-digital-system-will-allow-trains-to-talk-to-tracks.html>
- [40] Thousands of hours in delays to be saved as UK's first mainline digital railway introduced 22 June 2020  
<https://www.gov.uk/government/news/thousands-of-hours-in-delays-to-be-saved-as-uks-first-mainline-digital-railway-introduced>
- [41] Pokusaev O. et al. On System of Systems ontologies in the national standards for UK digital railways //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 11. – S. 85-96.
- [42] Sokolov I. A. i dr. Vozmozhnosti razvitiya cifrovoj zheleznoj dorogi, kak bazy mul'timodal'noj transportnoj sistemy umnyh gorodov v uslovijah cifrovoj jekonomiki //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 12.
- [43] 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. Str. 129- 166
- [44] Kuprijanovsky V. et al. Bandwidth and economy of the digital railway in the transformation of signaling and train control //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 3. – S. 117-132.
- [45] Kuprijanovsky V. P. et al. Economics of innovations for digital railways. Experience in the UK //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 3. – S. 79-99.
- [46] vorgelegt von B.Eng. Robert Lensing „BIM and construction process data in mechanized tunnel construction“ Milestone control for tunnel construction sites using automatically created process data in comparison with 4D BIM, Master Thesis im Rahmen des Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“ (UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z\_GIS) der Paris Lodron-Universität Salzburg 2017  
<http://unigis.sbg.ac.at/files/Masterthesen/Full/103255.pdf>
- [47] Mahsa Ghaznavi Developing an Information Modeling Framework for Tunnel Construction Projects , A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Construction Engineering & Management Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta 2013  
<https://era.library.ualberta.ca/items/7c81bff6-500a-4e2a-9fa1-7d5d781023dc>
- [48] Javier Ramos Jubierre ,Consistency preservation methods for multi scale design of subway infrastructure facilities, Vollständiger Abdruck der von der Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigten Dissertation. 2017  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Consistency-preservation-methods-for-multi-scale-of-Jubierre-Javier/6d4ea447604a96076b10c9ff076aa6b0616f430c>
- [49] A multi-scale product model for shield tunnels based on the Industry Foundation Classes Javier Ramos Jubierre André Borrmann Technische Universität München Version: 5.09.2014  
[https://publications.cms.bgu.tum.de/reports/2014\\_Jubierre\\_IfcTunnel.pdf](https://publications.cms.bgu.tum.de/reports/2014_Jubierre_IfcTunnel.pdf)
- [50] Abdullah Alsahly Advanced computational techniques for mechanized tunneling along arbitrary alignments and tunnel face stability analysis Ruhr University Bochum 2018  
<https://hss-opus.ub.ruhr-unibochum.de/opus4/frontdoor/index/index/start/3/rows/10/sortfield/score/sortorder/desc/searchtype/simple/query/bim/docId/6082>
- [51] IFC4-precise-Candidate-Standard-1,  
<https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/08/IFC4-precise-Candidate-Standard-1.pdf>
- [52] Phil Jackson Nordic Study of Classification Systems for Infrastructure & Transportation ,Version 1.0 July 2020, bSI Document Number: IR-2020-1022-TR,  
<https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/08/Nordic-Study-of-Classification-Systems-for-Infrastructure-Transportation-v1.0-1.pdf>
- [53] Ulrich Maidl, Marc Comulada, Janosch Stascheit and Felix Hegemann, Maidl Tunnelconsultants , TunnelTECH Integrating TBM management data with BIM, 17 Jan 2019,

- <https://www.tunneltalk.com/TunnelTECH-Jan2019-Digital-data-management-of-BIM-applications.php>
- [54] Crossrail 2 [https://en.wikipedia.org/wiki/Crossrail\\_2](https://en.wikipedia.org/wiki/Crossrail_2)
- [55] BADGER D1.1. Use Case analysis and user requirements, BADGER, March 2017 Gora, P., & Rüb, I. (2016). Traffic models for self-driving connected cars. Transportation Research Procedia, 14(14), 2207-2216.
- [56] Kuprijanovskij V. P. i dr. CIFROVYE DVOJNIKI NA BAZE RAZVITIIJa TEHNOLOGIJ BIM, SVJaZANNYE ONTOLOGIJAMI, 5G, IOT I SMESHANNOJ REAL"NOST"Ju DLJa ISPOL"ZOVANIJa V INFRASTRUKTURNYH PROEKTAH I IFRABIM //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 3.
- [57] Roland Herr, TunnelTalk ,Tunnel 4.0 - digital twin is the future ,The use of digital tools during the entire process of tunnel, 04 Jun 2020 <https://www.tunneltalk.com/TunnelTECH-June2020-Digitization-for-the-benefit-of-infrastructure-planning-design-construction-and-operation.php>.